

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

Факультет електроенерготехніки та автоматики

Кафедра теоретичної електротехніки

«На правах рукопису»
УДК 621.316.9

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

_____ М. Я. Островерхов

«__» _____ 20__ р.

Магістерська дисертація

на здобуття ступеня магістра

**зі спеціальності 141 Електроенергетика, електротехніка та
електромеханіка**

**на тему: «Вплив фільтрової ємності на характеристики
високовольтного випрямляча з подвоєнням напруги»**

Виконав

студент VI курсу, групи ЕВ-71мп

Алдакімов Євгеній Володимирович _____

Керівник:

Професор кафедри теоретичної електротехніки,

д.т.н, професор, Бржезицький В. О. _____

Консультант з маркетингу:

Ст. викладач кафедри промислового маркетингу, к.е.н.,

Царьова Т. О. _____

Рецензент: _____

Засвідчую, що у цій магістерській
дисертації немає запозичень з праць
інших авторів без відповідних
посилань.

Студент _____

Київ – 2018 року

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Факультет електроенерготехніки та автоматики
Кафедра теоретичної електротехніки

Рівень вищої освіти – другий (магістерський) за освітньо-професійною програмою

Спеціальність (спеціалізація) – 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» («Техніка та електрофізика високих напруг»)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Заступник директора

ТОВ «ІНТЕЛТЕХ»

_____ О. А. Філонова

«__» _____ 20__ р.

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ М. Я. Островерхов

«__» _____ 20__ р.

ЗАВДАННЯ
на магістерську дисертацію студенту
Алдакімову Євгенію Володимировичу

1. Тема дисертації «Вплив фільтрової ємності на характеристики високовольтного випрямляча з подвоєнням напруги», науковий керівник дисертації **Бржезицький Володимир Олександрович, д.т.н., професор**, затверджені наказом по університету від «07» листопада 2018 р. №4107-с
2. Термін подання студентом дисертації: 19 грудня 2018 року.
3. Об'єкт дослідження: високовольтний випрямляч з подвоєнням напруги зі зміною значення фільтрової ємності.
4. Вихідні дані: частота напруги 50 Гц; випрямляч за схемою Грейнахера-Латура з додатковим каскадом фільтрації пульсації напруги; усереднене значення вихідної напруги 30 кВ; кількість стабілітронів (Д818Д) 3300 шт.; омичне навантаження 12 МОм.
5. Перелік завдань, які потрібно розробити: метод розрахунку зміни характеристик високовольтного випрямляча в залежності від значення його фільтрової ємності; методика розрахунку характеристик випрямляча; масив розрахункових значень характеристик випрямляча; аналіз даних проведених розрахунків.

6. Орієнтовний перелік графічного (ілюстративного) матеріалу: схема високовольтного випрямляча; формули розрахунку режимів випрямляча; пульсації вихідної напруги випрямляча; таблиця підсумкових результатів розрахунків; висновки.

7. Орієнтовний перелік публікацій:

8. Консультанти розділів дисертації

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Маркетинг високовольтного обладнання	Царьова Т. О., ст. викладач кафедри промислового маркетингу		

9. Дата видачі завдання: 03 Вересня 2018 року

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Термін виконання етапів магістерської дисертації	Примітка
	Складання плану. Огляд каскадних генераторів високої напруги	Вересень 2018	
	Характеристики високовольтного однофазного випрямляча з подвоєнням напруги. Розрахунок вихідних параметрів	Жовтень 2018	
	Дослідження зміни вхідних та вторинних параметрів режиму випрямляча в залежності від значення фільтрової ємності	Листопад 2018	
	Стартап-проект: Система аналізу фільтрової ємності в однофазному випрямлячі з подвоєнням напруги	Грудень 2018	

Студент

Є. В. Алдакімов

Науковий керівник дисертації

В. О. Бржезицький

РЕФЕРАТ

Магістерська дисертація містить: сторінок – 120, рисунків – 24, таблиць – 21, кількість використаних джерел – 13.

Актуальність теми. Вплив фільтрової ємності на характеристики високовольтного випрямляча з подвоєнням напруги в теперішньому глобалізованому світі набуває все більшого поширення, що пов'язано із науковою, а також комерційною необхідністю задля економії коштів виробництв, які використовують високовольтні випрямлячі напруги. Отримані дані цікаві для об'єктів енергетики, галузям, в яких застосовується електрофарбування, підприємствам, де виконують нанесення порошкових покриттів, підприємствам, які користуються випробувальними установками високої напруги постійного струму.

Найкращий спосіб представлення інформації про вплив фільтрової ємності на характеристики високовольтного випрямляча є розрахунок параметрів випробуваного випрямляча високої напруги. Отримані розрахунки дозволяють якісно та точно визначити параметри випрямляча, оцінити та розрахувати найбільш точне значення ємності для випрямляча, над яким проводять дослідження.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дана магістерська дисертаційна робота виконувалась відповідно до наявних планів науково-дослідних робіт кафедри теоретичної електротехніки Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського».

Мета і задачі дослідження. Виконати розрахунок зміни характеристик високовольтного випрямляча в залежності від значення його фільтрової ємності та обґрунтувати його основні компоненти і частини.

Об'єктом дослідження. Високовольтний випрямляч з подвоєнням напруги зі зміною значення фільтрової ємності.

Предмет дослідження. Розробка методу дослідження впливу фільтрової ємності на характеристики високовольтного випрямляча з подвоєнням напруги.

Методи дослідження, що використовуються у магістерській дисертації: методи теоретичних основ електротехніки, теорія електричних кіл, теорія лінійних та нелінійних процесів в електроустановках.

Наукова новизна одержаних результатів. Сформульований теоретичний базис комплексного рішення систем рівнянь для струмів, напруг та потужностей елементів типової установки високої напруги постійного струму з урахуванням нелінійних пульсацій.

Практичне значення одержаних результатів. Отримані теоретичні результати можуть бути використані для розрахунків, проектування, оптимізації режимів широкого спектру установок високої напруги постійного струму технічного, технологічного, а також вимірювального призначення

Ключові слова. Випрямляч з подвоєнням напруги, високовольтний, стабілітрон, вольт-амперна характеристика, пульсація.

ABSTRACT

The master's dissertation contains: pages - XX, drawings - 24, tables - 21, number of sources used - 13.

Actuality of theme. The influence of the filter capacitance on the characteristics of a high-voltage rectifier with doubling of voltage in the present globalized world is becoming increasingly widespread, which is associated with the scientific as well as commercial necessity in order to save on production costs using high-voltage rectifier voltages. The obtained data are interesting for objects of power engineering, branches where electroplating is used, enterprises, where powder coatings are used, for enterprises that use high-voltage test equipment of direct current.

The best way to present information on the effect of a filter capacity on the characteristics of a high-voltage rectifier is to calculate the parameters of the tested high voltage rectifier. The obtained calculations allow to accurately and accurately determine the weaknesses of the rectifier, to estimate and calculate the most exact value of the capacity for the rectifier, over which the experiments are carried out. This is possible due to the video analysis system proposed to be developed in this dissertation.

Relationship of work with scientific programs, plans, themes. The given master's dissertation work was carried out in accordance with existing plans of research works of the Department of Theoretical Electrical Engineering of the National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute ".

The object of research. High-voltage rectifier with doubling of voltage with change in filter capacity value.

Subject of study. Development of the system of analysis of the influence of the filter capacitance on the characteristics of the high-voltage rectifier with doubling of the voltage incl. and power engineering

Methods of research used in the master's thesis: methods of theoretical foundations of electrical engineering, theory of electric tracks, theory of linear and nonlinear processes in electrical installations. Scientific novelty of the obtained results. The theoretical basis of the complex solution of the systems of equations for currents, voltages and capacities of the elements of a typical high voltage DC installation with the account of nonlinear pulsations is formulated.

The practical value of the results. The obtained theoretical results can be used for calculating, designing, optimizing the modes of a wide range of installations of high voltage direct current of technical, technological, and also measuring purpose.

Keywords. Voltage doubler rectifier, high-voltage, Zener diode, voltage-current characteristic.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ І УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ.....	9
ВСТУП	10
1. ОГЛЯД КАСКАДНИХ ГЕНЕРАТОРІВ ВИСОКОЇ НАПРУГИ	11
2. ХАРАКТЕРИСТИКИ СПЕЦІАЛІЗОВАНОГО ВИСОКОВОЛЬТНОГО ОДНОФАЗНОГО ВИПРАМЛЯЧА З ПОДВОЄННЯМ НАПРУГИ	28
2. ХАРАКТЕРИСТИКИ СПЕЦІАЛІЗОВАНОГО ВИСОКОВОЛЬТНОГО ОДНОФАЗНОГО ВИПРАМЛЯЧА З ПОДВОЄННЯМ НАПРУГИ	28
3. РОЗРАХУНОК ВИХІДНИХ ПАРАМЕТРІВ	43
5. ДОСЛІДЖЕННЯ ЗМІНИ ВТОРИННИХ ПАРАМЕТРІВ РЕЖИМУ ВИПРАМЛЯЧА В ЗАЛЕЖНОСТІ ВІД ЗНАЧЕННЯ ФІЛЬТРОВОЇ ЄМНОСТІ	95
6. СТАРТАП: КОМЕРЦІАЛІЗАЦІЯ ТЕМИ МАГІСТЕРСЬКОЇ ДИСЕРТАЦІЇ «ВПЛИВ ФІЛЬТРОВОЇ ЄМНОСТІ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ВИСОКОВОЛЬТНОГО ВИПРАМЛЯЧА З ПОДВОЄННЯМ НАПРУГИ». МАРКЕТИНГОВИЙ АНАЛІЗ.	104
ВИСНОВКИ.....	118
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	119

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ І УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

ХХ –холостий хід

КГПВН – каскадний генератор пульсуючої високої напруги

АС – змінний струм

ДС – постійний струм

ВН –висока напруги

ВСТУП

Вплив фільтрової ємності на характеристики високовольного випрямляча з подвоєнням напруги зараз набуває все більшого поширення, що пов'язано із науковою, а також комерційною необхідністю задля економії коштів виробництв, які використовують високовольні випрямлячі напруги. Розраховані дані цікаві для об'єктів енергетики, виробництвам, в яких застосовується електрофарбування, підприємствам, де виконують нанесення порошкових покриттів.

Найкращий варіант подання інформації про вплив фільтрової ємності на характеристики високовольного випрямляча є розрахунок параметрів випробуваного випрямляча високої напруги. Дані, які будуть отримані дозволять якісно та точно визначити параметри випрямляча, розрахувати найточніше значення ємності для випрямляча, над яким проводять дослідження.

У магістерській роботі буде проведено розробку методу дослідження впливу фільтрової ємності на характеристики високовольного випрямляча з подвоєнням напруги

Розділ 1. Огляд каскадних генераторів високої напруги

Призначення генераторів

Велика кількість електротехнічних пристроїв і технологічних процесів пов'язана з використанням сильних електростатичних полів і енергії постійного струму високої напруги. До них відносяться пристрої прямого прискорення заряджених частинок, генератори, призначені для випробування ізоляції електроустаткування ЛЕП постійного струму, блоки живлення радіотехнічних схем, промислових фільтрів, рентгенівських апаратів і томографів, установок магнітно імпульсної обробки металів, електронно-іонної технології, зарядних пристроїв ємнісних нагромаджувачів енергії тощо.

Постійну високу напругу отримують за допомогою різноманітних схем випрямлення змінної напруги, ключовими елементами яких є високовольтний трансформатор, конденсаторно-діодна група, фільтр вищих гармонік і струмообмежувальні резистори.

Схеми напруги за числом фаз живлення поділяють на одно-, дво-, трифазні і т.д.; за кількістю півперіодів змінної напруги, що використовуються, — на одно- і двопівперіодні; за відношенням між значеннями вихідної і вхідної напруги випрямляча — на схеми для подвоєння, потроєння, множення. [1]

Оглядаючи переваги і недоліки випрямних високовольтних пристроїв та порівнюючи однотипні схеми, слід детальніше оглянути: вибір діодів не тільки за значенням допустимого прямого струму, а також за значенням зворотної напруги; необхідність врахування струмообмежувальних резисторів; варіанти напруги конденсаторів залежно від умов їх роботи у схемі; можливість небажаного підмагнічування сталі трансформатора; значення вихідного опору схеми і варіанти її поєднання разом з навантаженням; пульсацію вихідної напруги; варіанти заземлення потрібної

точки схеми відповідно без погіршення роботи випробного транс-форматора та умов роботи у даній схемі навантажувального опору.[1]

Схема однопівперіодного випрямлення

Схема однопівперіодного випрямлення (рис.1.1) складається з невеликої кількості елементів і є складовою частиною у більшість складніших випрямних схем.

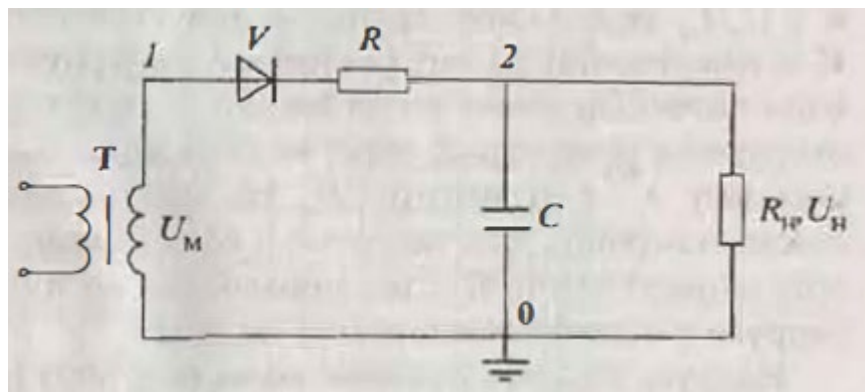


Рис. 1.1 Схема однопівперіодного випрямляча[1].

У режимі ХХ (холостого ходу) ($R \rightarrow \infty$) конденсатор без саморозряду зарядиться до амплітудного значення — напруги на боці високої напруги трансформатора.

Струмообмежувальний опір обирають R , розглядаючи умову $R = U_M / I_M$. У навантажувальному режимі діод відкритий в проміжку $t_2 - t_1$ коли потенціал анода діода більший за потенціал катода. Падіння напруги на резисторі R заважає зарядці конденсатора в період часу $t_2 - t_1$ до напруги U_M . [1]

Напруга на діоді у режимі ХХ змінюється від нуля до $2U_M$. Робочу напругу конденсатора обирають рівною 0. У навантажувальному режимі сталь

магнітопроводу намагнічується постійною складовою магнітного потоку, це потрібно враховувати під час вибору потужності високовольтного трансформатора. Частота пульсації вихідної напруги рівна частоті мережі. Схема допускає одночасне заземлення обмотки трансформатора (ВН) і навантаження.

Вихідний опір джерела напруги має бути мінімальним. У іншому разі навантажувальна характеристика $U_H = f(I_H)$ зменшується при зростанні сили струму навантаження (зменшення R_H). [1]

З аналізу кривих (Рис. 1.2) отримуємо — рівність амплітудного значення напруги у обмотці ВН трансформатора і напруга на навантаженні виконується, якщо $\omega R_H C \geq 400$ та $R / R_H \leq 0,0005$, де значення R_H наведені в [Ом]; C — в [Ф]; ω — в [с⁻¹]. Спочатку здається, що дану схему однопівперіодного випрямлення з ємнісним виходом можна застосувати як джерело пульсуючої напруги, якщо навантаження доєднати паралельно діоду (Рис. 1.3). [1]

Через значний вихідний опір, однаковий із внутрішнім опором закритого діода, дана схема з високоомним навантаженням застосовується дуже обмежено.

Заземлення будь-якої точки ізольованої системи електроживлення не впливає на напругу і силу струму навантаження.

Не слід забувати, що від точки заземлення системи відповідно залежать потенціали інших її вузлів.. Проблема живлення розжарення кенотрона полягає у потрапляння під високий потенціал U_H малої (6—8 В) різниці потенціалів, які виконують за допомогою спеціального знижувального трансформатора розжарення. [1]

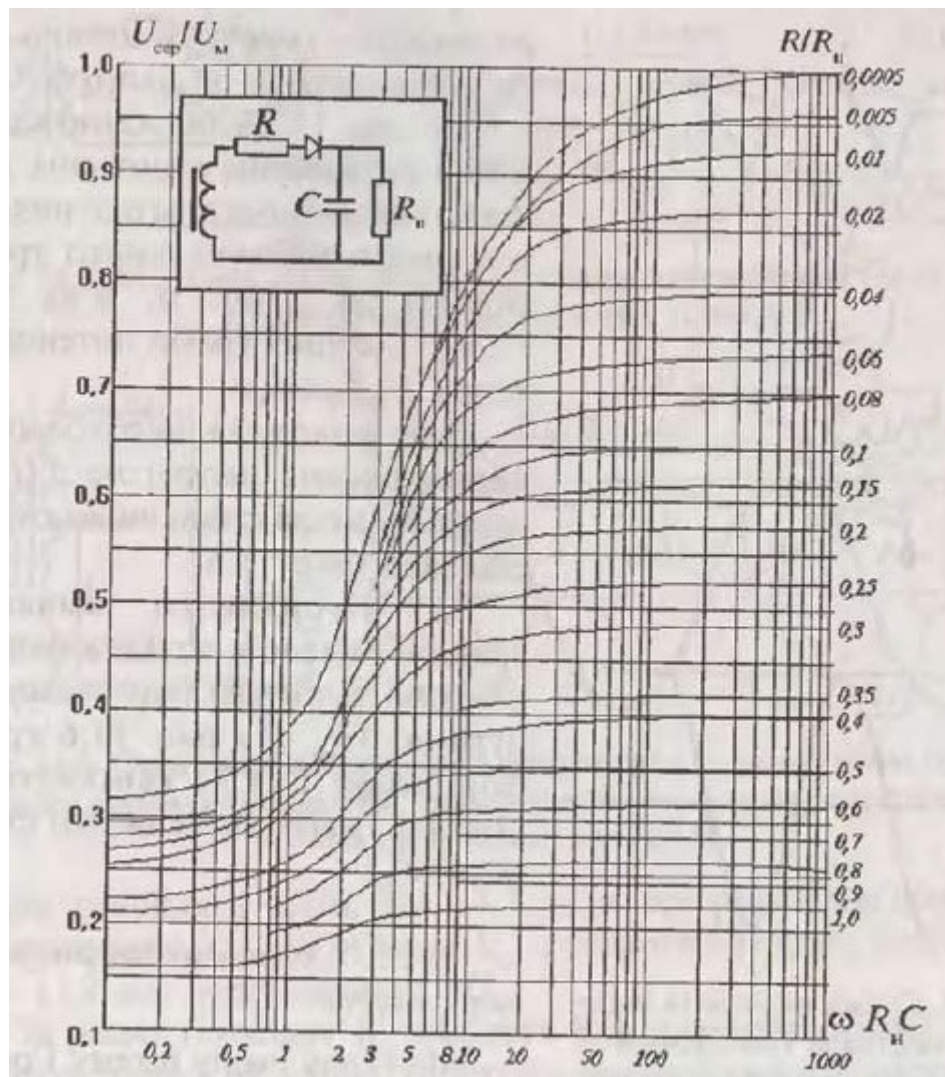


Рис. 1.2 Номограма для визначення внутрішнього падіння напруги у схемі
рис.1.1.[1]

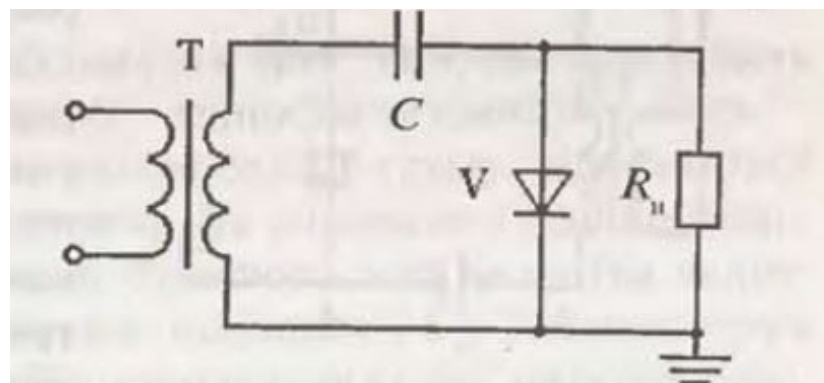


Рис. 1.3 Схема для джерела пульсуючої напруги у якої великий вхідний
опір.[1]

Схеми двопівперіодного випрямлення

Місткову схему (Гретца) двопівперіодного випрямлення, а також осцилограми потенціалів її характерних точок зображено на рис. 1.4. Схема і осцилограми для двопівперіодної схеми з виведеною середньою точкою трансформатора — на рис. 1.5.

Двом схемам притаманні такі переваги: збільшена вдвічі, порівняно з частотою живильної мережі частота пульсації випрямленої напруги; унеможливлення підмагнічування сталі трансформатора постійним магнітним потоком; невеликий вихідний опір. [1]

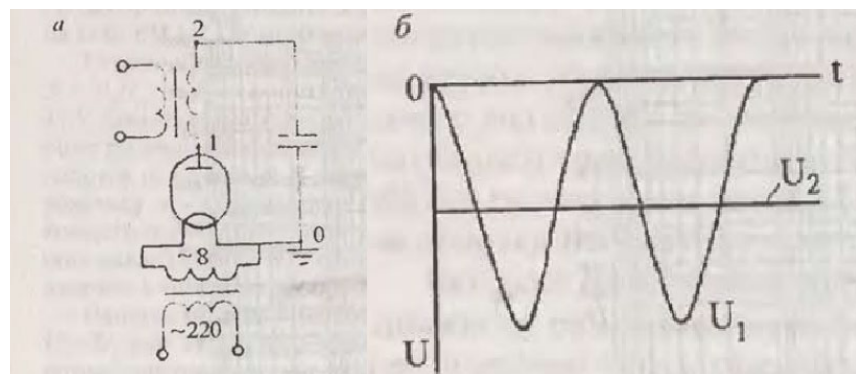


Рис. 1.4 Схема для вмикання кенотрона у нейтраль трансформатора (а), осцилограми для потенціалів у точках 1 і 2 (б).[1]

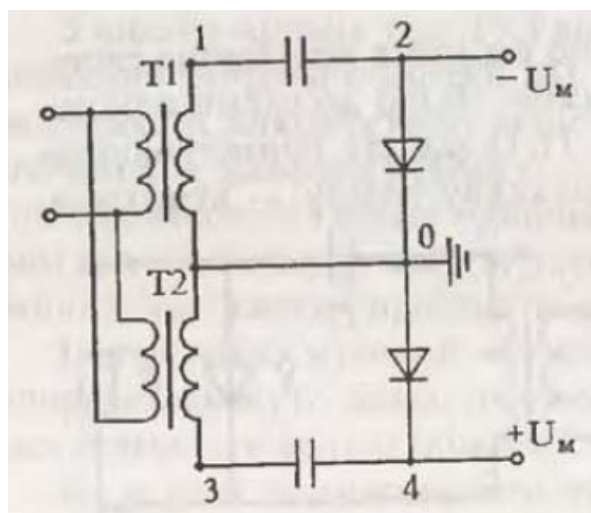


Рис. 1.5 Послідовне з'єднання двох схем пульсуючої напруги.[1]

Схеми подвоєння напруги

Двотактна схема подвоєння напруги (рис. 1.6) дає змогу отримати симетричну напругу відносно заземленої точки.

Підзарядка конденсаторів, увімкнених у схему, здійснюється у різні півперіоди живильної мережі. Як бачимо з осцилограми, що показана на рис. 1.6(б), у режимі ХХ зворотна напруга, прикладена до закритих діодів, рівна $2U_M$. Підмагнічування сталі магнітопроводу постійним магнітним потоком відсутнє. Про внутрішнє падіння напруги можна судити за кривими з номограми рис. 1.7. [1]

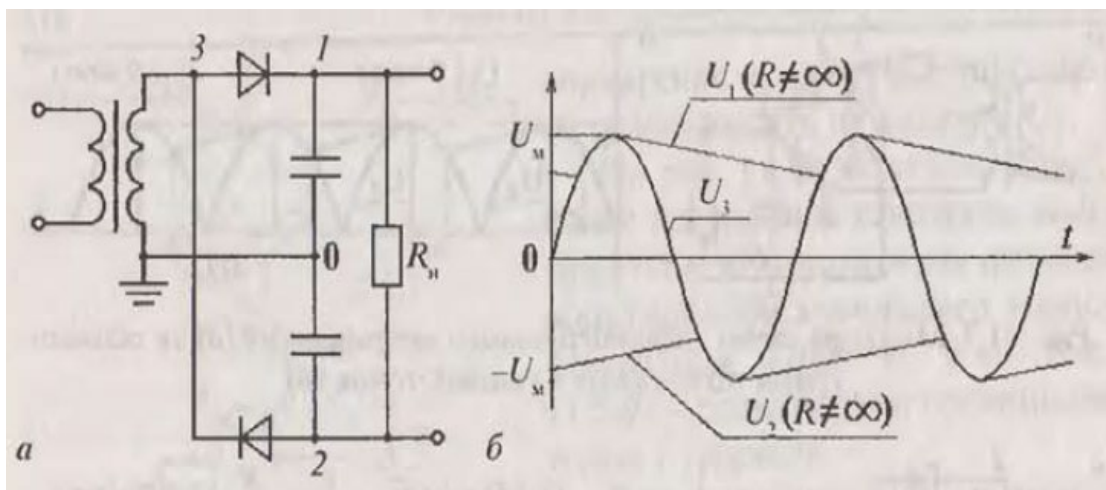


Рис. 1.6 Двотактна схема для подвоєння напруги (а), осцилограма потенціалів вузлових точок (б).[1]

Неважко довести, що в момент t_8 потенціал точки 2 отримає значення $(13/8)U_M$, у момент t_9 — значення $(29/16)U_M$. Під час переходу від одного періоду до іншого напруга конденсатора C_2 , майже рівна $2U_M$, а час відкритого стану діодів у режимі ХХ роботи схеми прямує до 0. Потенціал точки 3

пульсує від нуля до $2U_M$, а конденсатор C_1 — заряджається до напруги U_M , конденсатор C_2 — $2U_M$. Щоб змінити полярності вихідної напруги потрібно перемкнути діоди.[1]

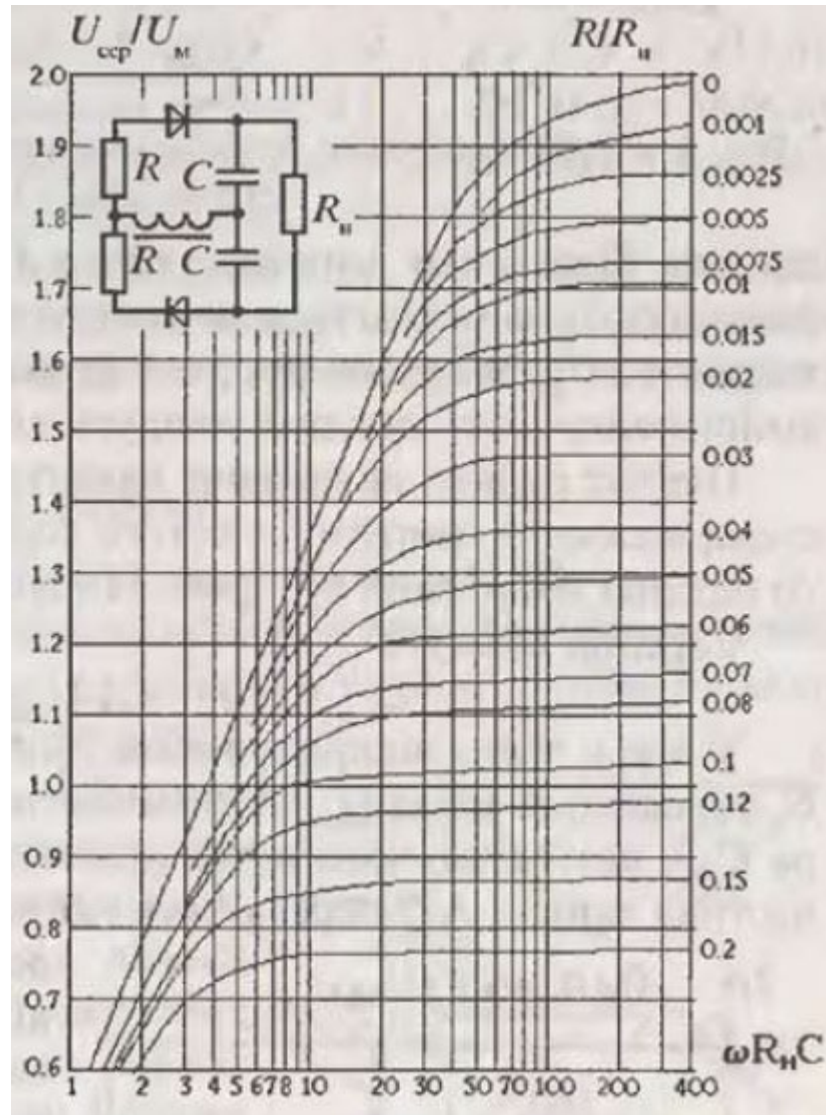


Рис. 1.7 Номограма внутрішнього падіння напруги у схемі, що показана на рис. 1.6.[1]

Під час роботи на активне навантаження напруга $U_{ср}$ на виході схеми менша за напругу U_2 на значення внутрішньої різниці напруги ΔU_{\min} і пульсує з амплітудою δU_{\min} .

Перевага схеми, що зображено на рис. 1.8, полягає у змозі одночасного заземлення однієї точки обмотки ВН трансформатора та однієї точки об'єкта, що випробовується.

Недоліки схеми: вихідний опір — більший, ніж у схемі, що зображена на рис. 1.6, потреба вибору конденсатора C_2 , на напругу $2U_M$, пульсація вихідної напруги рівна з частотою мережі, а не з подвоєною частотою мережі.[1]

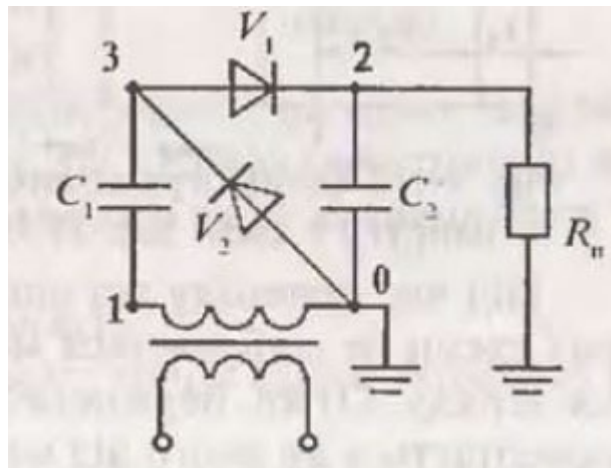


Рис. 1.8 Схема подвоєння напруги Грейнахера-Латура.[1]

Схема потроєння напруги

Якщо верхній за схемою кінець обмотки трансформатора (точка 1) приймає позитивний потенціал порівняно з точкою 4, то обидва діоди і конденсатори C_1 і C_2 заряджаються до максимальної напруги обмотки ВН трансформатора із середньою заземленою точкою. Незважаючи на падіння напруги на відкритих діодах і струмообмежувальних резисторах, вважаємо, що вихідна напруга у даний момент рівна напрузі живильного трансформатора. [1]

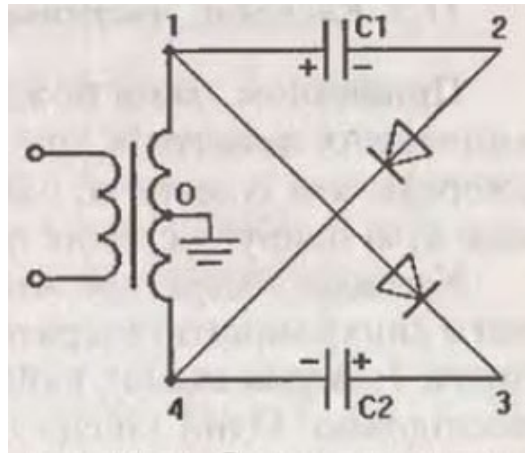


Рис. 1.9 Схема потроєння напруги.[1]

У наступний півперіоду діоди закриті, і напруга на виході, що рівна сумі напруг обмотки ВН трансформатора і обох заряджених конденсаторів, досягає значення $3U_M$.

Осцилограми потенціалів вузлових точок даної схеми показано на рис. 1.10. [1]

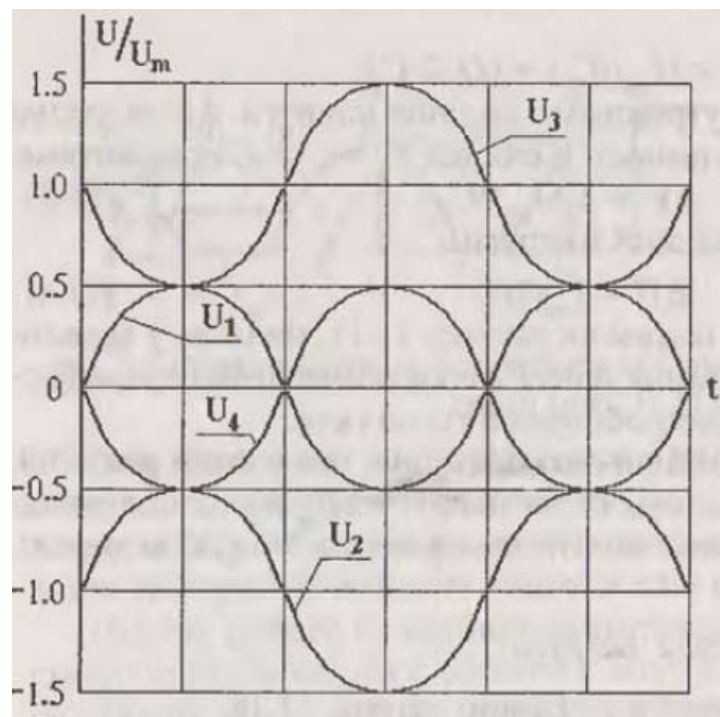


Рис. 1.10 Осцилограми потенціалів вузлових точок схеми рис. 1.9.[1]

Якщо дві схеми потроєння з'єднати послідовно (рис. 1.11), то можемо отримати два режими:

1. за узгодженого з'єднання обмоток трансформаторів (рис. 1.11 (а)) напруга на виході схеми у режимі ХХ пульсує від $2U_M$ до $6U_M$:

$$U = 2U_M(2 + \sin \omega t);$$

2. за зустрічного (рис. 1.11 (б)) напруга на виході схеми

$$U = U_M(2 + \sin \omega t) + U_M(2 - \sin \omega t).$$

Проте слід зазначити, що застосування схем, що зображені на рис. 1.9 і рис. 1.11 — обмежене, тому що в них великий вихідний опір.[1]

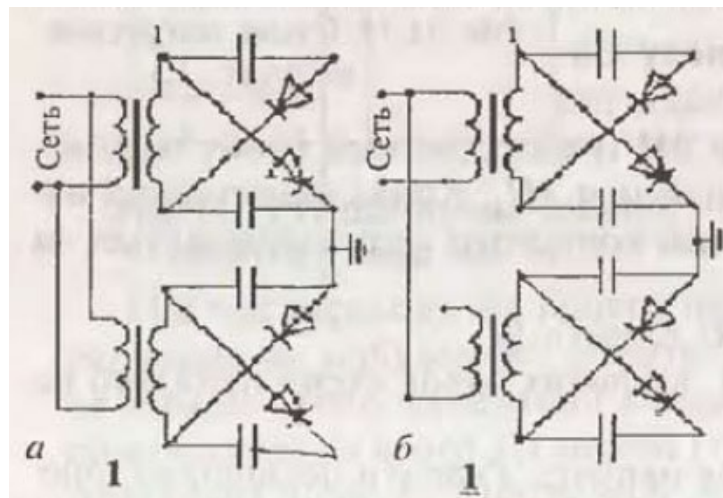


Рис. 1.11 Послідовне з'єднання двох схем.[1]

Каскадні генератора постійної високої напруги

Принципові схеми варіантів можливих каскадних з'єднань найпростіших випрямних пристроїв, які дають змогу без пошкоджень ізоляції джерела, що їх живить, одержати на виході напругу, яка рівна сумі напруг окремих пристроїв (рис. 1.12) [1]

Каскадні генератори живляться від електромережі, окремого синхронного генератора чи інвертора через регулятор напруги I . У даних схемах найпростіші випрямні пристрої 2 з'єднані послідовно. Один з кінців ланцюжка випрямлячів заземлюється, а до іншого кінця приєднується навантаження. Живлення здійснюється від підвищувального високовольтного трансформатора здійснюється або послідовно, або ж паралельно.[1]

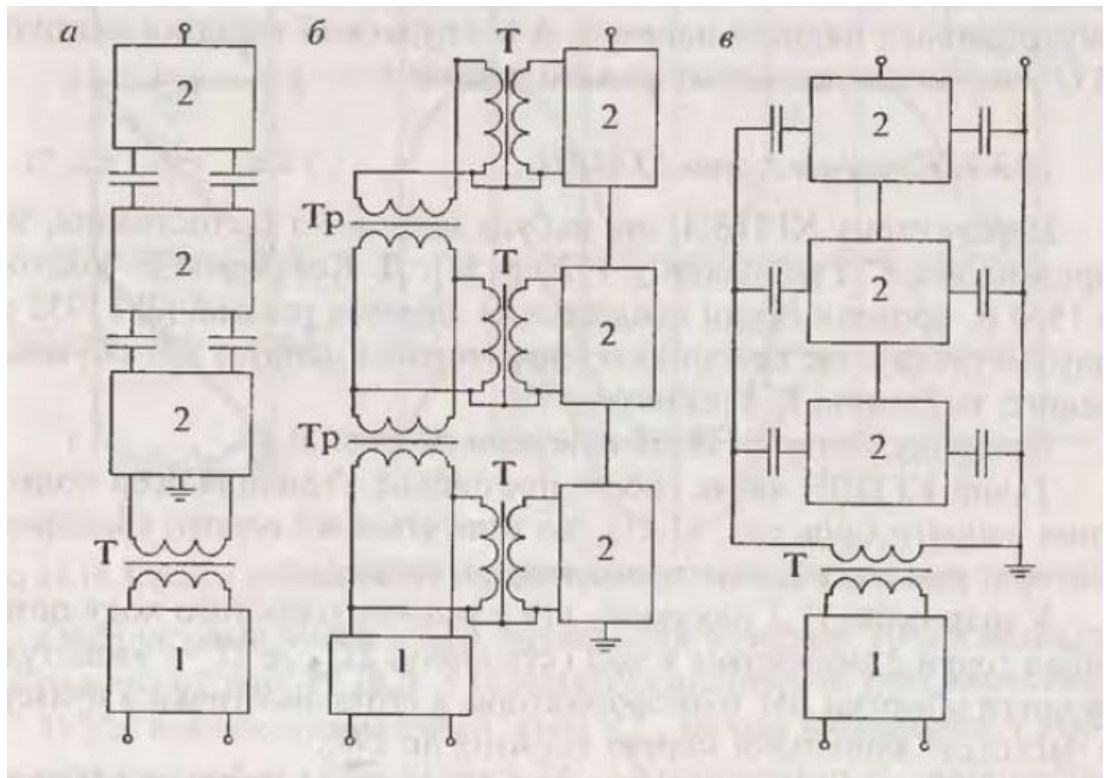


Рис. 1.12 Блок-схеми каскадних генераторів високої постійної напруги.[1]

У схемах, зображених на рис. 1.12, передбачено ємнісну розв'язку на високій постійній напрузі.

Головними параметрами генератора постійної високої напруги (КГПВН) є номінальна напруга, номінальний випрямлений струм, номінальна потужність і кількість ступенів каскаду. Якість КГПВН оцінюється за його

коефіцієнтом корисної дії, а також за даними внутрішнього падіння напруги і пульсації вихідної напруги у навантажувальному режимі роботи[1]

Класична схема КГПВН

Класичну схему КГПВН наведено на рис. 1.13.

Даний КГПВН являє собою послідовне з'єднання схем подвоєння напруги (див. рис. 1.8), які живляться від одного трансформатора, що розміщений на нульовому потенціалі.

На вхід нижнього ступеня каскаду направлено напругу обмотки ВН трансформатора, до того ж потенціал точки 0 не залежить від часу, а потенціал точки 1 має зміну в часі від плюс U_M до мінус U_M , має максимальну різницю потенціалів у точці 1 та становить $2U_M$.

Аналогічність у зміні потенціалів на вході та виході нижнього (рис. 1.13), а ступеня каскаду дає змогу стверджувати, що при відсутності витоків зарядів на виході верхнього ступеня каскаду в точці 4 потенціал збільшиться у 4 рази, потенціал точки 5 змінюватиметься від $2U_M$ до $4U_M$, а на виході n -ступінчастого каскаду постійна у часі напруга в режимі ХХ буде дорівнювати:

$$U_X = U_{2n} = 2nU_M \cdot [1]$$

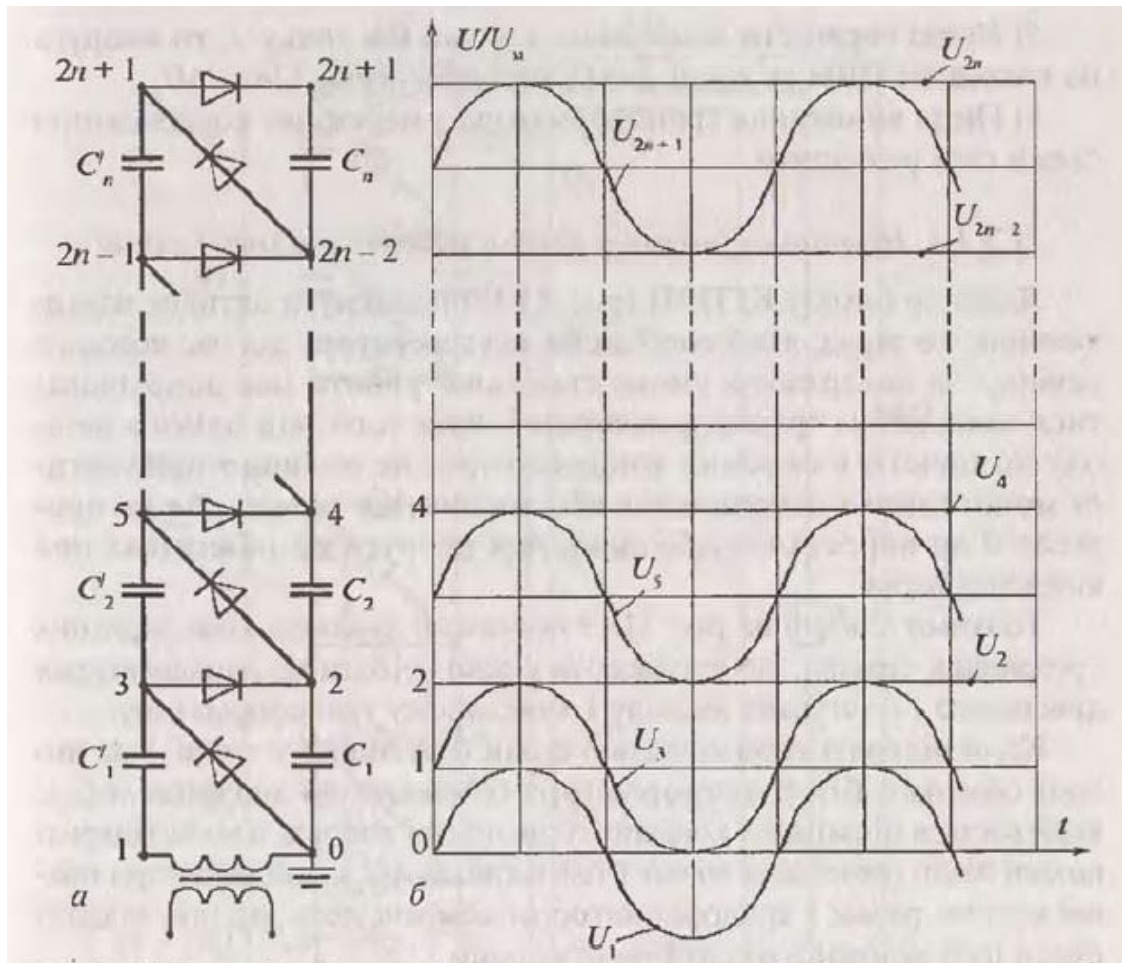


Рис. 1.13 Схема Грейнахера (а) і осцилограми потенціалів вузлових точок (б).[1]

Осцилограми зображено на рис. 1.13 (б). З їх аналізу отримуємо
ВИСНОВКИ:

1. Всі конденсатори даної схеми, крім C_1 , мають обиратися за умови тривалої роботи при напрузі $2U_M$. Конденсатор C_1 , обирається на напругу U_M .
2. Обернена напруга діодів має перевищувати $2U_M$, оскільки всі діоди перебувають під дією різниці потенціалів, що пульсує від нуля до $2U_M$.

3. На правій колоні конденсаторів, що зображені на рис. 1.13, окрім постійної напруги $2nU_M$ у точці $2n$, виникають потенціали, що забезпечують примусовий і рівномірний розподіл напруги по всій висоті генератора, що допомагає зменшенню його габаритних розмірів.
4. Щоб змінити полярність постійних потенціалів парних точок схеми з «плюса» на «мінус» потрібно перемикаєти всі діоди.
5. Якщо перемістити заземлення з точки 0 в точку I , то напруга на виході КГПВН (у точці $2n+1$), то вона буде рівною $(2n-1)U_M$.
6. Після того, як вимкнуть трансформатор з мережі всі конденсатори у схемі слід розрядити.[1]

Навантажувальний режим роботи класичної схеми

Якщо до виходу КГПВН (рис. 1.14) під'єднати активне навантаження, то заряд, який навантаження дістає від генератора під час кожного періоду, за умови дотримання стабільної роботи має додаватися живильним трансформатором. Від одного до іншого періоду в окремих конденсаторах не повинно відбуватися одноманітного накопичення чи зменшення зарядів, бо це призвело б до збільшення або зменшення напруги на обкладках даних конденсаторів.

Тонкими лініями виділено замкнені кола зарядних і розрядних струмів (рис. 1.14), які проходять у різні періоди по даних конденсаторах довільного i -го ступеня каскаду і живильному трансформатору . [1]

Порівнюючи зміни потенціалус U_{2n} , з незмінною в часі напругою XX $2nU_M$ отримуємо, що у режимі навантаження на внутрішніх реактивностях і резисторах каскаду проглядається середнє падіння напруги ΔU . Форма

вихідної напруги отримується за допомогою суми середнього значення випрямленої напруги $U_{\text{сеп}}$ і несинусоїдальної релаксаційної накладки.[1]

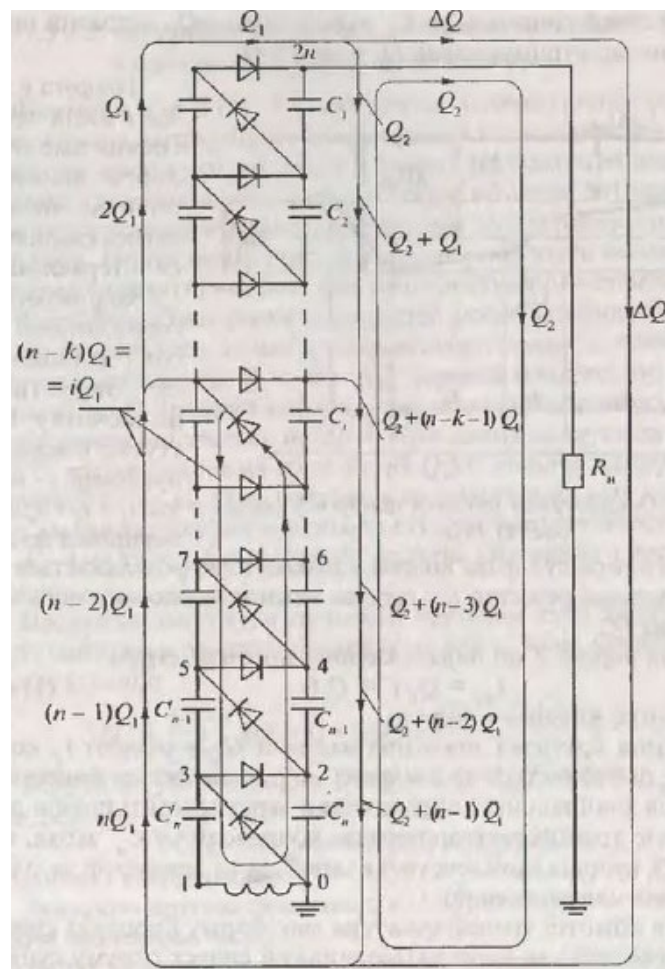


Рис. 1.14 Поширення зарядів у навантажувальному режимі системи Грейнахера.[1]

Нумерують каскади зазвичай зверху донизу. Струму в обмотці трансформатора притаманна форма коротких сплесків і протікає двічі за період. Позитивний сплеск струму означає перенесенням заряду nQ_1 .

Величини зарядів, які проходять іншими конденсаторами обох колон, видно на рис. 1.14. Струми протікають через конденсатори двічі за період, в той же час струми по горизонтальних і похилих діодах даної схеми протікають один раз за період, але в різний час. Найвищі струми протікають по

конденсаторах нижнього n -го ступеня і обмотці ВН трансформатора. Також не спостерігається підмагнічування постійною складовою магнітного потоку магнітопроводу трансформатора.[1]

Висновки до розділу 1.

В даному розділі було оглядово розкрито тему призначення генераторів, однопівперіодного випрямляча, двопівперіодного випрямляча, схему подвоєння напруги, схему потроєння напруги, схему КГПВН, навантажувальний режим роботи класичної схеми.

Наведені приклади схем, осцилограм та поширення зарядів (окремі випадки) для тем, що наведені у пункті 1.

Розділ 2. ХАРАКТЕРИСТИКИ СПЕЦІАЛІЗОВАНОГО ВИСОКОВОЛЬТНОГО ОДНОФАЗНОГО ВИПРАМЛЯЧА З ПОДВОЄННЯМ НАПРУГИ

Різноманіття застосувань високих напруг для встановлених режимів технологічних установок (електрофільтри вугільних електростанцій, пристрої електрофарбування та напилення покриттів, електросепаратори) обумовлює необхідність вдосконалення даних джерел електроживлення до рівня 100 -200 кВ. У зв'язку з цим останнім часом виникає інтерес до різних варіантів вдосконалення класичного генератора постійної напруги Кокрофта-Уолтона з числом каскадів три і більше. У той же час, у вигляді досягнення високої якості високовольтних діодів для отримання вказаного нижче рівня напруги більш ефективно використовувати генератор Кокрофта-Уолтона всього лиш з подвоєнням випрямленої напруги, а для зниження рівня пульсацій вихідної напруги – доповнювати його «вбудованим» R, C – фільтром [2].

Слід відзначити, що до теперішнього часу сувора математична модель генератора Кокрофта-Уолтона не створена. Наявні публікації з неї дають різні результати відносно величини пульсацій напруги, відсутні аналітичні вирази для форми пульсацій та інші.

У зв'язку з цим у даному розділі наведена нова розробка авторського колективу [5-6] по створенню елементів теорії напруг і струмів генератора Кокрофта – Уолтона з подвоєнням напруги, разом з доповнюючим його R, C – фільтром також, крім того, з можливістю введення в його навантаження нелінійних елементів (стабілітронів).

Метою є узагальнення результатів формулювання та дослідження підсумкових аналітичних виразів як для напруг і струмів у схемі випрямляча з подвоєнням напруги за рис. 2.1, так і для потужностей елементів генератора Кокрофта-Уолтона з подвоєнням напруги і доповнюючим його R, C – фільтром

з обліком режимів нелінійних пульсацій. Для скорочення термінології будемо називати такий генератор спеціалізованим високовольтним випрямлячем з подвоєнням напруги.

Предмет дослідження – спеціалізований високовольтний однофазний випрямляч з подвоєнням напруг за узагальненою схемою, зображений на рис.1

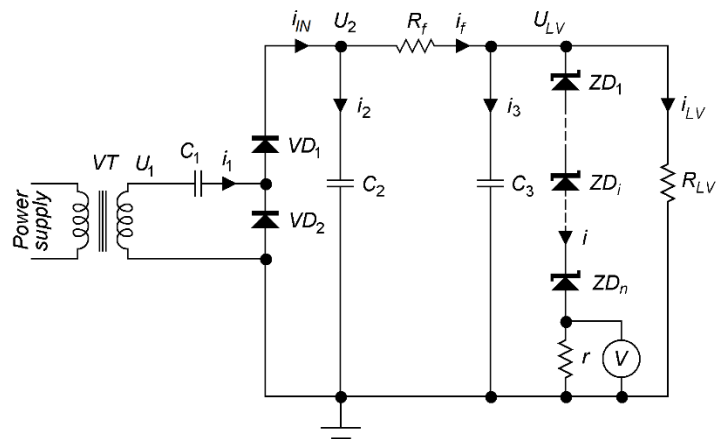


Рис. 2.1 Функціональна схема випрямляча з подвоєнням напруги [2].

На рис. 2.1 VT – високовольтний підвищуючий трансформатор; $VD1$, $VD2$ – високовольтні діоди; $C1, C2, C3$ – конденсатори; R_f, R_{LV}, r – резистори. Гілка n стабілітронів ZD_1, \dots, ZD_n , резистора r та вольтметра V утворює «вбудовану» високоточну вимірювальну групу напруги навантаження U_{LV} . При цьому джерело напруги за схемою рис.2.1 набуває інтерес як для технологічних застосувань, так і для вимірювальних установок [9, 10]. Її особливістю є те, що вимірюванням параметрів елементів можна в широкому діапазоні регулювати амплітуду і форму пульсацій вихідної напруги U_{LV} . У сучасних публікаціях розглядаються питання синтезу кіл з ємносними накопичувачами енергії, в тому числі, з використанням нелінійних електричних навантажень [10-11]. Адже особливістю джерела високої

напруги за схемою рис.1 у відомих публікаціях інших авторів не досліджувалося. Розрахункові співвідношення напруг і струмів за схемою рис. 2.1 були вперше отримані в роботах [5-6].

Вихідні передумови дослідження полягають в ряді умов :

- типова вольт-амперна характеристика стабілітронів має вид , зображений на рис. 2.2, де u_0, I_0 позначають вибрану точку його робочого режиму;
- диференційний опір стабілітрона $r_d = du_{ZD} / di_{ZD}$ в його робочій області набагато менший повного опору u_0, I_0 ;
- ємкісний струм стабілітрона $C_{ZD} \frac{du_{ZD}}{dt}$ набагато менше його скрізного струму I_0 (C_{ZD} – міжелектродна ємність стабілітрона);
- виконання стабілітронів у металічному корпусі (рис. 2.3) повністю екранує його внутрішній активний елемент від впливу зовнішніх електричних полів [4].

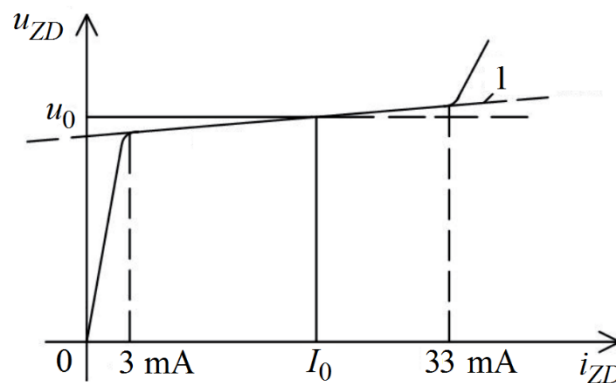


Рис. 2.2 Вольт-амперна характеристика стабілітрона Д818Д [2].

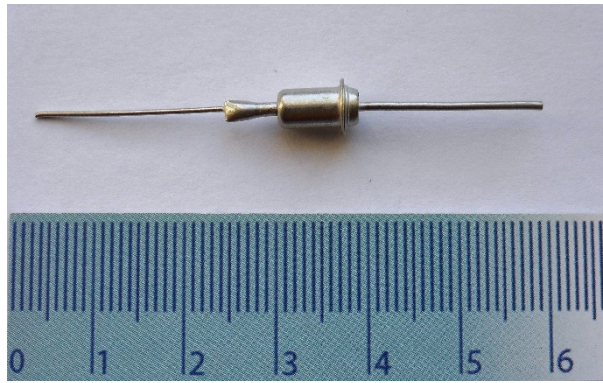


Рис. 2.3 Вольт-амперна характеристика стабілітрона Д818Д [2].

При виконанні цих умов послідовне з'єднання однотипних стабілітронів в усталеному режимі характеризується протіканням даними колами одного й того ж струму I_0 з робочою точкою напруги.

$$U_0 = u_{01} + u_{02} + \dots + u_{0i} + \dots + u_{0n} ,$$

а також сумарним диференціальним опором

$$R_d = r_{d1} + r_{d2} + \dots + r_{di} + \dots + r_{dn} ,$$

що відповідає заключенню [2] про допустимість послідовного з'єднання будь-якого числа стабілітронів. Типове «високовольтне» виконання ізоляційної конструкції послідовного кола однотипних стабілітронів позбавляє від необхідності обліку корони та інших явищ розподілених струмів [2].

Висновок вихідних виразів. Тоді для миттєвої напруги навантаження $u_{LV}(t)$ можна записати :

$$u_{LV}(t) = U_0 + I_0 r + (i(t) - I_0)(R_d + r) , \quad (1)$$

де $i(t)$ – миттєве значення струму в колах стабілітронів і резистора r . Звідси можна отримати:

$$i(t) = \frac{u_{LV}(t) - U_0 - I_0 r}{R_d + r} + I_0, \quad (2)$$

Співвідношення (1) і (2) дійсні у межах стабілізованої ділянки вольт-амперної характеристики стабілітронів (рис. 2.2) і, отже, застосовані до рівня пульсацій струму $\sim 50\%$ (при виборі I_0 в середній частині даної ділянки). Особливістю співвідношень (1) і (2) є також те, що вони можуть передбачати (за відповідним вибором параметрів U_0, R_d) будь-які варіанти послідовного з'єднання стабілітронів і резистора r , аж до граничних:

«тільки стабілітронного» навантаження або «тільки резистивного» навантаження.

Припустимо:

$$u_{LV}(t) = U_0 + I_0 r + \Delta u(t)$$

де: $\Delta u(t)$ – пульсація напруги навантаження в часі.

При цьому

$$\int_0^T \Delta u(t) dt = 0$$

де: T – період напруги $u_1(t) = U_m \cdot \sin(\omega t)$, $\omega = 2\pi f$ – кутова частота, f – частота напруги, $T = 1/f$ – період.

Уявімо $i_3 = C_3 \cdot du_{LV}(t)/dt$ (облік втрат в конденсаторах схеми рис. 2.1 незначно уточнює отримані результати [5]) і $i_{LV} = u_{LV}(t)/R_{LV}$.

Тоді струм, який протікає через резистор R_f , буде складатися з:

$$i_f = I_0 + \frac{\Delta u(t)}{R_d + r} + \frac{U_0 + I_0 r + \Delta u(t)}{R_{LV}} + C_3 \frac{du_{LV}(t)}{dt},$$

а напруга:

$$u_{C2}(t) = u_{LV}(t) + i_f R_f.$$

В свою чергу, $i_2 = C_2 \cdot du_{C2}(t)/dt$ і повний струм на вході з правої частини схеми рівний:

$$\begin{aligned} i_{IN} &= i_f + i_2 = \\ &= I_0 + \frac{u_0 + I_0 r}{R_{LV}} + \Delta u(t) \left(\frac{1}{R_{LV}} + \frac{1}{R_d + r} \right) + \\ &+ \frac{d\Delta u(t)}{dt} \left(C_3 + C_2 \left(1 + \frac{R_f}{R_{LV}} + \frac{R_f}{R_d + r} \right) \right) + \\ &+ C_2 C_3 R_f \frac{d^2 \Delta u(t)}{dt^2}. \end{aligned} \quad (3)$$

Оскільки процес проходить циклічно, уявимо, що в момент часу t_1 діод $VD1$ "відкривається", і виникає протікання струму $i_1 = i_{IN}$ (опір діода $VD1$ у

відкритому стані можна знехтувати). У момент часу $t_2 > t_1$ діод $VD1$ "закривається" (опір діода в закритому стані приймаємо безкінечно великим). У проміжку часу $t_2 \leq t \leq T + t_1$ струм $i_{IN} = 0$. Виходячи з цього для даного проміжку часу (3) отримуємо рівняння для функції виду:

$$\begin{aligned} \frac{d^2 \Delta u_1(t)}{dt^2} + a_1 \frac{d \Delta u_1(t)}{dt} + a_2 \Delta u_1(t) = \\ = -\frac{I_0 + \frac{1}{R_{LV}}(U_0 + I_0 r)}{C_2 C_3 R_f}, \end{aligned} \quad (4)$$

де

$$\begin{aligned} a_1 = \frac{C_3 + C_2 \left(1 + \frac{R_f}{R_{LV}} + \frac{R_f}{R_d + r} \right)}{C_2 C_3 R_f}, \\ a_2 = \frac{\frac{1}{R_{LV}} + \frac{1}{R_d + r}}{C_2 C_3 R_f}. \end{aligned}$$

Дослідження коренів p_1, p_2 характеристичного рівняння $p^2 + a_1 p + a_2 = 0$ вказує, що його дискримінант $D > 0$. Таким чином, рішення для знаходимо у вигляді:

$$\Delta u_1(t) = A_1 e^{p_1 t} + A_2 e^{p_2 t} + \Delta u_{1s}, \quad (5)$$

де: Δu_{1s} – усталена напруга.

Для промислових частот електроживлення схеми на рис. 2.1 можна не враховувати індуктивність її елементів. Тому, у режимі відкритого вентиля $VD1$ (у проміжку часу $t_1 \leq t \leq t_2$) маємо [2]:

$$i_N(t) = i_1(t),$$

$$u_{C2} = U_m \sin(\omega t) + U_m - \frac{1}{C_1} \int_{t_1}^t i_1(t) dt.$$

Після диференціювання даного виразу отримуємо:

$$\frac{du_{C2}(t)}{dt} = \omega U_m \cos(\omega t) - \frac{1}{C_1} i_1(t)$$

отже:

$$i_1(t) = C_1 \omega U_m \cos(\omega t) - C_1 \frac{du_{C2}(t)}{dt}. \quad (6)$$

Використовуючи вираз $u_{C2}(t) = u_{LV}(t) + i_f(t) \cdot R_f$ і виконуючи його диференціювання, а також підставляючи (6) в (3), отримаємо рівняння для функції $\Delta u_2(t)$ в період часу $t_1 \leq t \leq t_2$:

$$\begin{aligned} \frac{d^2 \Delta u_2(t)}{dt^2} + b_1 \frac{d \Delta u_2(t)}{dt} + b_2 \Delta u_2(t) = \\ = \frac{C_1 \omega U_m \cos(\omega t)}{R_f C_3 (C_1 + C_2)} - \frac{I_0 + \frac{1}{R_{LV}} (U_0 + I_0 r)}{R_f C_3 (C_1 + C_2)}, \end{aligned} \quad (7)$$

де:

$$b_1 = \frac{C_3 + (C_1 + C_2) \left(1 + \frac{R_f}{R_{LV}} + \frac{R_f}{R_d + r} \right)}{R_f C_3 (C_1 + C_2)},$$

$$b_2 = \frac{\frac{1}{R_{LV}} + \frac{1}{R_d + r}}{R_f C_3 (C_1 + C_2)}.$$

Дискримінант характеристичного рівняння в цьому випадку також більше нуля, і рішення для $\Delta u_2(t)$ находимо у вигляді:

$$\Delta u_2(t) = A_3 \sin(\omega t + \psi) + A_4 e^{p_3 t} + A_5 e^{p_4 t} + \Delta u_{2s}, \quad (8)$$

де: Δu_{2s} – усталена напруга; p_3, p_4 – корені характеристичного рівняння $p^2 + b_1 p + b_2 = 0$. Значення A_3 і визначаються наступними виразами:

$$A_3 = \frac{C_1 \omega U_m}{R_f C_3 (C_1 + C_2) \sqrt{b_1^2 \omega^2 + (b_2 - \omega^2)^2}},$$

$$\psi = \arctan\left(\frac{b_2 - \omega^2}{b_1 \omega}\right).$$

Порівнюючи (5) і (8), знаходимо:

$$\Delta u_{1s} = \Delta u_{2s} = \Delta u_s = -\frac{I_0 + \frac{1}{R_{LV}}(U_0 + I_0 r)}{\frac{1}{R_{LV}} + \frac{1}{R_d + r}}$$

де: Δu_s – постійна складова напруги пульсації.

Використовуючи незмінність u_{C2} і u_{C3} в моменти часу t_1, t_2 , а також визначення t_1 з умови $U_m(1 + \sin(\omega t_1)) = u_{C2}(t_1)$, а момента часу t_2 з умови $i_1(t_2) = 0$,

а також вираз $\int_{t_2}^{T+t_1} \Delta u_1(t) dt + \int_{t_1}^{t_2} \Delta u_2(t) dt = 0$. отримаємо систему з семи алгебраїчних рівнянь (9)-(15) з сімома невідомими: $A_1, A_2, A_3, A_4, A_5, t_1, t_2$.

$$\begin{aligned} \omega A_3 \cos(\omega \Delta t + \psi) + p_3 A_4 e^{p_3 \Delta t} + p_4 A_5 e^{p_4 \Delta t} = \\ = p_1 A_1 + p_2 A_2; \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \omega A_3 \cos(\psi) + p_3 A_4 + p_4 A_5 = \\ = p_1 A_1 e^{p_1(T-\Delta t)} + p_2 A_2 e^{p_2(T-\Delta t)}; \end{aligned} \quad (10)$$

$$A_3 \sin(\psi) + A_4 + A_5 = A_1 e^{p_1(T-\Delta t)} + A_2 e^{p_2(T-\Delta t)}; \quad (11)$$

$$A_3 \sin(\omega \Delta t + \psi) + A_4 e^{p_3 \Delta t} + A_5 e^{p_4 \Delta t} = A_1 + A_2; \quad (12)$$

$$\begin{aligned} \frac{A_3}{\omega} (\cos(\psi) - \cos(\omega \Delta t + \psi)) = -\Delta u_s T - \\ - \frac{A_1}{p_1} (e^{p_1(T-\Delta t)} - 1) - \frac{A_2}{p_2} (e^{p_2(T-\Delta t)} - 1) - \\ - \frac{A_4}{p_3} (e^{p_3 \Delta t} - 1) - \frac{A_5}{p_4} (e^{p_4 \Delta t} - 1); \end{aligned} \quad (13)$$

$$t_1 = \frac{1}{\omega} \arcsin \left(\frac{F_1}{U_m} - 1 \right); \quad (14)$$

$$t_2 = \frac{1}{\omega} \arccos \left(\frac{F_2}{\omega U_m} \right). \quad (15)$$

В (14) F_1 визначається виразом:

$$\begin{aligned}
F_1 = & I_0 R_f + (U_0 + I_0 r) \left(1 + \frac{R_f}{R_{LV}} \right) + \\
& + (\Delta u_s + A_3 \sin(\psi) + A_4 + A_5) \left(1 + \frac{R_f}{R_{LV}} + \frac{R_f}{R_d + r} \right) + \\
& + C_3 R_f (\omega A_3 \cos(\psi) + p_3 A_4 + p_4 A_5) .
\end{aligned}$$

У свою чергу, в (15) F_2 визначається виразом:

$$\begin{aligned}
F_2 = & C_3 R_f \left(-\omega^2 A_3 \sin(\omega \Delta t + \psi) + p_3^2 A_4 e^{p_3 \Delta t} + \right. \\
& + p_4^2 A_5 e^{p_4 \Delta t} \left. \right) + \left(1 + \frac{R_f}{R_{LV}} + \frac{R_f}{R_d + r} \right) (\omega A_3 \cos(\omega \Delta t + \psi) + \\
& + p_3 A_4 e^{p_3 \Delta t} + p_4 A_5 e^{p_4 \Delta t}) .
\end{aligned}$$

Також відзначимо, що $\Delta t = t_2 - t_1$, а зв'язок A_3 з U_m визначена вище.

Рівняння (9)-(13) являються лінійними по відношенню до $A_1, \dots, A_j, \dots, A_5$, в зв'язку з чим система рівнянь (9)-(15) може бути приведена до трьох рівнянь з трьома невідомими t_1, t_2, A_j . Наш досвід проведення розрахунків по (9)-(15) підтверджує можливість отримання в кожному конкретному випадку єдиного рішення системи у множині реальних чисел.

Розвиток теорії. Отримані вище вихідні вирази (1)-(15) приведені з публікацій авторського колективу [2] і необхідні для подальшого викладення матеріалів даної статті.

Перевагою отриманого аналітичного рішення задачі, яка розглядається, передбачається її логічне завершення у висновку виразів для потужності елементів схеми рис. 2.1 з урахуванням пульсацій напруг і струмів в них.

Втрати потужності при навантаженні R_{LV} можуть бути знайдені наступним чином:

$$P_{LV} = f \int_{t_2}^{T+t_1} \frac{[u_{LV}(t)]^2}{R_{LV}} dt + f \int_{t_1}^{t_2} \frac{[u_{LV}(t)]^2}{R_{LV}} dt, \quad (16)$$

де, $u_{LV}(t) = U_0 + I_0 r + \Delta u_1(t)$ для проміжку часу $t_2 \leq t \leq T + t_1$, і $u_{LV}(t) = U_0 + I_0 r + \Delta u_2(t)$ для $t_1 \leq t \leq t_2$.

Тоді перетворюємо (16) до наступного виду:

$$\begin{aligned} \frac{R_{LV} P_{LV}}{f} &= \left(\frac{R_{LV} P_{LV}}{f} \right)^{(1)} + \left(\frac{R_{LV} P_{LV}}{f} \right)^{(2)} = \\ &= \int_{t_2}^{T+t_1} [V_0 + \Delta u_1(t)]^2 dt + \int_{t_1}^{t_2} [V_0 + \Delta u_2(t)]^2 dt, \end{aligned} \quad (17)$$

де $V_0 = U_0 + I_0 r$.

Вираз для потужності втрат електроенергії в групі елементів $ZD_1 \dots ZD_n$, і з урахуванням попереднього розгляду буде мати вигляд:

$$P_i = f \int_{t_2}^{T+t_1} \left[[V_0 + \Delta u_1(t)] \cdot \left[\frac{\Delta u_1(t)}{R_d + r} + I_0 \right] \right] dt +$$

$$+ f \int_{t_1}^{t_2} \left[V_0 + \Delta u_2(t) \right] \cdot \left[\frac{\Delta u_2(t)}{R_d + r} + I_0 \right] dt \quad (18)$$

Далі перетворюємо вираз (18) до форми:

$$\begin{aligned} \frac{P_i}{f} &= \left(\frac{P_i}{f} \right)^{(1)} + \left(\frac{P_i}{f} \right)^{(2)} = \\ &= \int_{t_2}^{T+t_1} \left[V_0 I_0 + \Delta u_1(t) \left(I_0 + \frac{V_0}{R_d + r} \right) + \frac{(\Delta u_1(t))^2}{R_d + r} \right] dt + \\ &+ \int_{t_1}^{t_2} \left[V_0 I_0 + \Delta u_2(t) \left(I_0 + \frac{V_0}{R_d + r} \right) + \frac{(\Delta u_2(t))^2}{R_d + r} \right] dt \quad (19) \end{aligned}$$

Потужність втрат електроенергії в активному опорі фільтра R_f може бути визначена за формулою :

$$P_f = f \int_{t_2}^{T+t_1} [(i_{f1})^2 R_f] dt + f \int_{t_1}^{t_2} [(i_{f2})^2 R_f] dt \quad (20)$$

де величини i_{f1}, i_{f2} мають наступний вигляд:

$$\begin{aligned} i_{f1} &= I_0 + \frac{U_0 + I_0 r}{R_{LV}} + \Delta u_1(t) \left(\frac{1}{R_{LV}} + \frac{1}{R_d + r} \right) + \\ &+ C_3 \frac{d\Delta u_1(t)}{dt} \quad , \\ i_{f2} &= I_0 + \frac{U_0 + I_0 r}{R_{LV}} + \Delta u_2(t) \left(\frac{1}{R_{LV}} + \frac{1}{R_d + r} \right) + \end{aligned}$$

$$+ C_3 \frac{d\Delta u_2(t)}{dt} .$$

Тоді перетворюємо вираз (20) до виду:

$$\begin{aligned} \frac{P_f}{R_f f} &= \left(\frac{P_f}{R_f f} \right)^{(1)} + \left(\frac{P_f}{R_f f} \right)^{(2)} = \\ &= \int_{t_2}^{T+t_1} \left(I_0^{(2)} + \Delta u_1(t) \left(\frac{1}{R_{LV}} + \frac{1}{R_d + r} \right) + C_3 \frac{d\Delta u_1(t)}{dt} \right)^2 dt + \\ &+ \int_{t_1}^{t_2} \left(I_0^{(2)} + u_2(t) \left(\frac{1}{R_{LV}} + \frac{1}{R_d + r} \right) + C_3 \frac{d\Delta u_2(t)}{dt} \right)^2 dt . \end{aligned}$$

де, $I_0^{(2)} = I_0 + (U_0 + I_0 r) / R_{LV}$.

За результатами розрахунків визначалося максимальне позитивне значення пульсації $\Delta u(t) = \Delta_1$ і мінімальне негативне значення пульсації $\Delta u(t) = \Delta_2$, а також коефіцієнт амплітуди пульсацій

$$\Delta_p = \frac{\Delta_1 - \Delta_2}{2V_0} 100, \% . \quad (21)$$

Використовуючи отримані вище значення P_{LV}, P_i , визначимо енергетичний коефіцієнт корисної дії установки ДЕТУ 08-04-99 з нелінійним навантаженням:

$$EFF = \frac{P_{LV} + P_i}{P_{LV} + P_i + P_f} 100 = \frac{1}{1 + P_f / (P_{LV} + P_i)} 100, \% . \quad (22)$$

Висновки до розділу 2.

В даному розділі було узагальнення результатів формулювання та дослідження підсумкових аналітичних виразів як для напруг і струмів у схемі випрямляча з подвоєнням напруги, так і для потужностей елементів генератора Кокрофта-Уолтона з подвоєнням напруги і доповнюючим його R, C – фільтром з обліком режимів нелінійних пульсацій.

Визначили втрату потужності при навантаженні, потужність втрат електроенергії в групі елементів $ZD_1...ZD_n$, потужність втрат електроенергії в активному опорі фільтра, коефіцієнт амплітуди пульсацій, енергетичний коефіцієнт корисної дії установки ДЕТУ 08-04-99 з нелінійним навантаженням.

Розділ 3. Розрахунок вихідних параметрів

В даному розділі проведемо розрахунок вихідних параметрів для спеціалізованого високовольтного випрямляча з подвоєнням напруги по загальній схемі, що зображена на рис. 2.1. Розрахунок буде проведений відповідно до попереднього розділу даної роботи.

Дані для розрахунку наведені нижче:

$$V_0 = 30 \text{кВ}$$

$$U_0 = 29,7 \text{кВ}$$

$$C_1 = 0,1 \text{мкФ}$$

$$C_2 = C_3 = 0,072 \text{мкФ}$$

$$R_f = 1,78 \text{МОм}$$

$$r = 60 \text{кОм}$$

$$r_d = 22 \text{Ом}$$

$$I_0 = 5 \text{мА}$$

$$I_{LV} = 2,5 \text{мА}$$

$$u_0 = 9 \text{В}$$

$$f = 50 \text{Гц}$$

$$\omega = 2\pi f$$

$$T = 0,02 \text{с}$$

$$n = U_0 / u_0 = 29700 / 9 = 3300 \text{шт} \text{ — кількість стабілітронів, відповідно режиму}$$

$$V = 30 \text{кВ} .$$

$R_d = nr_d = 3300 \cdot 22 = 72600 \text{ Ом}$ – сумарний диференційний опір.

Для розрахунку $\Delta u_1(t) = A_1 e^{p_1 t} + A_2 e^{p_2 t} + \Delta u_{1s}$ (формула (5) у розділі 2), потрібно отримати корені характеристичного рівняння $p^2 + a_1 p + a_2 = 0$:

$$\begin{aligned} p_1 &= -7,2253072356 \\ p_2 &= -113,2386784403 \end{aligned}$$

Для відповідного розрахунку $\Delta u_2(t) = A_3 \sin(\omega t + \psi) + A_4 e^{p_3 t} + A_5 e^{p_4 t} + \Delta u_{2s}$ (8), потрібні корені характеристичного рівняння:

$$\begin{aligned} p_3 &= -3,03378914 \\ p_4 &= -112,8937159738 \end{aligned}$$

Як сказано у розділі 2, порівнявши (5) і (8), знаходимо:

$$\Delta u_{1s} = \Delta u_{2s} = \Delta u_s = - \frac{I_0 + \frac{1}{R_{LV}}(U_0 + I_0 r)}{\frac{1}{R_{LV}} + \frac{1}{R_d + r}}$$

де: Δu_s – постійна складова напруги пульсації.

$$\Delta u_{1s} = \Delta u_{2s} = \Delta u_s = - \frac{5 \cdot 10^{-3} + (\frac{1}{12 \cdot 10^7}) \cdot 30000}{(\frac{1}{12 \cdot 10^7}) + (\frac{1}{72600 + 60 \cdot 10^3})} = -695,3816$$

Знаходимо розв'язання для алгебраїчних рівнянь (9) – (15), виведення яких знаходиться у розділі 2.

ψ – приймаємо рівним:

$$\psi = \arctan\left(\frac{b_2 - \omega^2}{b_1 \omega}\right) = -1,2162.$$

Для розрахунку A_1, A_2, A_3, A_4, A_5 , підбираємо значення Δt довільно. Для $V_0 = 30 \text{ кВ}$ візьмемо значення $\Delta t = 0,000353743$.

$$\begin{aligned} \omega A_3 \cos(\omega \Delta t + \psi) + p_3 A_4 e^{p_3 \Delta t} + p_4 A_5 e^{p_4 \Delta t} = \\ = p_1 A_1 + p_2 A_2; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \omega A_3 \cos(\psi) + p_3 A_4 + p_4 A_5 = \\ = p_1 A_1 e^{p_1(T-\Delta t)} + p_2 A_2 e^{p_2(T-\Delta t)}; \end{aligned}$$

$$A_3 \sin(\psi) + A_4 + A_5 = A_1 e^{p_1(T-\Delta t)} + A_2 e^{p_2(T-\Delta t)};$$

$$A_3 \sin(\omega \Delta t + \psi) + A_4 e^{p_3 \Delta t} + A_5 e^{p_4 \Delta t} = A_1 + A_2;$$

$$\frac{A_3}{\omega} (\cos(\psi) - \cos(\omega \Delta t + \psi)) = -\Delta u_s T -$$

$$-\frac{A_1}{p_1} (e^{p_1(T-\Delta t)} - 1) - \frac{A_2}{p_2} (e^{p_2(T-\Delta t)} - 1) -$$

$$-\frac{A_4}{p_3} (e^{p_3 \Delta t} - 1) - \frac{A_5}{p_4} (e^{p_4 \Delta t} - 1)$$

Розв'язавши 5 алгебраїчних рівнянь – отримаємо такі значення коефіцієнтів A :

$$A_1 = 796,7012765527$$

$$A_2 = -117,3726420339$$

$$A_3 = 299,9202208299$$

$$A_4 = 656,1584889822$$

$$A_5 = 303,6976529517$$

За допомогою даних коефіцієнтів A_1, A_2, A_3, A_4, A_5 виконуємо розрахунок F_1, F_2 :

$$\begin{aligned} F_1 = & I_0 R_f + (U_0 + I_0 r) \left(1 + \frac{R_f}{R_{LV}} \right) + \\ & + (\Delta u_s + A_3 \sin(\psi) + A_4 + A_5) \left(1 + \frac{R_f}{R_{LV}} + \frac{R_f}{R_d + r} \right) + \\ & + C_3 R_f (\omega A_3 \cos(\psi) + p_3 A_4 + p_4 A_5) \end{aligned}$$

та

$$\begin{aligned} F_2 = & C_3 R_f \left(-\omega^2 A_3 \sin(\omega \Delta t + \psi) + p_3^2 A_4 e^{p_3 \Delta t} + \right. \\ & + p_4^2 A_5 e^{p_4 \Delta t} \left. \right) + \left(1 + \frac{R_f}{R_{LV}} + \frac{R_f}{R_d + r} \right) (\omega A_3 \cos(\omega \Delta t + \psi) + \\ & + p_3 A_4 e^{p_3 \Delta t} + p_4 A_5 e^{p_4 \Delta t}). \end{aligned}$$

Отримаємо після підстановки і розв'язання:

$$F_1 = 38646,7878,$$

$$F_2 = 3972808,875.$$

Для розрахунку часу t_1, t_2 – потрібна величина U_m , яку можна знайти з рівняння A_3 :

$$A_3 = \frac{C_1 \omega U_m}{R_f C_3 (C_1 + C_2) \sqrt{b_1^2 \omega^2 + (b_2 - \omega^2)^2}},$$

з даного рівняння виразимо U_m :

$$U_m = \frac{A_3 (R_f C_3 (C_1 + C_2))}{C_1 \omega} \cdot \frac{b_1^2 \omega^2 + (b_2 - \omega^2)^2}{b_1 \omega \sqrt{1 + \left(\frac{b_2 - \omega^2}{b_1 \omega}\right)^2}}$$

отже,

$$U_m = 22071,38 \text{ В}$$

Отримані величини підставляємо у рівняння для розв'язання часу t_1, t_2 :

$$\begin{aligned} t_1 &= \frac{1}{\omega} \arcsin \left(\frac{F_1}{U_m} - 1 \right) = \\ &= \frac{1}{2\pi f} \arcsin \left(\frac{38646,7878}{22071,38} - 1 \right) = \\ &= 0,0027042382 \text{ с.}, \end{aligned}$$

ТАКОЖ

$$\begin{aligned}
 t_2 &= \frac{1}{\omega} \arccos\left(\frac{F_2}{\omega U_m}\right) = \\
 &= \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 50} \arccos\left(\frac{3972808,8749}{2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 22071,38}\right) = \\
 &= 0,0030579811 \text{ с.}
 \end{aligned}$$

Отримавши значення t_1, t_2 , виконаємо перевірку вірності вибору значення Δt .

$$\begin{aligned}
 \Delta t &= t_2 - t_1 = \\
 &= 0,0030579811 - 0,0027042382 = \\
 &= 0,000353743 \text{ с.}
 \end{aligned}$$

Перевіривши значення Δt можна зробити висновок, що дана схема з заданими вище параметрами працює.

Втрати потужності в навантаженні можна розрахувати наступним чином:

$$P_{LV} = f \int_{t_2}^{T+t_1} \frac{[u_{LV}(t)]^2}{R_{LV}} dt + f \int_{t_1}^{t_2} \frac{[u_{LV}(t)]^2}{R_{LV}} dt,$$

де, $u_{LV}(t) = U_0 + I_0 r + \Delta u_1(t)$ для проміжку часу $t_2 \leq t \leq T + t_1$, і $u_{LV}(t) = U_0 + I_0 r + \Delta u_2(t)$ для $t_1 \leq t \leq t_2$.

Тоді перетворимо вираз P_{LV} до наступного вигляду:

$$\begin{aligned} \frac{R_{LV}P_{LV}}{f} &= \left(\frac{R_{LV}P_{LV}}{f} \right)^{(1)} + \left(\frac{R_{LV}P_{LV}}{f} \right)^{(2)} = \\ &= \int_{t_2}^{T+t_1} [V_0 + \Delta u_1(t)]^2 dt + \int_{t_1}^{t_2} [V_0 + \Delta u_2(t)]^2 dt, \end{aligned}$$

де $V_0 = U_0 + I_0 r$. Перепишемо дану формулу проінтегрувавши кожний елемент і взявши $V_0^{(1)} = V_0 + \Delta u_s$, отримаємо:

$$\begin{aligned} \left(\frac{R_{LV}P_{LV}}{f} \right)^{(1)} &= (V_0^{(1)})^2 (T + t_1 - t_2) + \frac{A_1^2}{2p_1} \times \\ &\times [e^{2p_1(T+t_1-t_2)} - 1] + \frac{A_2^2}{2p_2} [e^{2p_2(T+t_1-t_2)} - 1] + \\ &+ \frac{2V_0^{(1)}A_1}{p_1} [e^{p_1(T+t_1-t_2)} - 1] + \frac{2V_0^{(1)}A_2}{p_2} \times \\ &\times [e^{p_2(T+t_1-t_2)} - 1] + \frac{2A_1A_2}{p_1 + p_2} [e^{(p_1+p_2)(T+t_1-t_2)} - 1]. \end{aligned} \quad (23)$$

$$\begin{aligned} \left(\frac{R_{LV}P_{LV}}{f} \right)^{(2)} &= (V_0^{(1)})^2 (t_2 - t_1) + A_3^2 \times \\ &\times \left[\frac{t_2 - t_1}{2} + \frac{1}{4\omega} [\sin(2\psi) - \sin(2(\omega(t_2 - t_1) + \psi))] \right] + \\ &+ \frac{A_4^2}{2p_3} [e^{2p_3(t_2-t_1)} - 1] + \frac{A_5^2}{2p_4} [e^{2p_4(t_2-t_1)} - 1] + \\ &+ \frac{2V_0^{(1)}A_3}{\omega} [\cos(\psi) - \cos[\omega(t_2 - t_1) + \psi]] + \frac{2V_0^{(1)}A_4}{p_3} \times \\ &\times [e^{p_3(t_2-t_1)} - 1] + \frac{2V_0^{(1)}A_5}{p_4} [e^{p_4(t_2-t_1)} - 1] + \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& + \frac{2A_3A_4}{\omega \left[\left(\frac{p_3}{\omega} \right)^2 + 1 \right]} \left[e^{p_3(t_2-t_1)} \left(\frac{p_3}{\omega} \sin[\omega(t_2-t_1)+\psi] - \right. \right. \\
& \left. \left. - \cos[\omega(t_2-t_1)+\psi] - \frac{p_3}{\omega} \sin(\psi) + \cos(\psi) \right) + \right. \\
& \left. + \frac{2A_3A_5}{\omega \left[\left(\frac{p_4}{\omega} \right)^2 + 1 \right]} \left[e^{p_4(t_2-t_1)} \times \right. \right. \\
& \left. \left. \times \left(\frac{p_4}{\omega} \sin[\omega(t_2-t_1)+\psi] - \cos[\omega(t_2-t_1)+\psi] \right) - \right. \right. \\
& \left. \left. - \frac{p_4}{\omega} \sin(\psi) + \cos(\psi) \right] + \frac{2A_4A_5}{p_3+p_4} \left[e^{(p_3+p_4)(t_2-t_1)} - 1 \right] \right]. \quad (24)
\end{aligned}$$

Отримаємо значення:

$$\left(\frac{R_{LV}P_{LV}}{f} \right)^{(1)} = 17538666,093147453,$$

$$\left(\frac{R_{LV}P_{LV}}{f} \right)^{(2)} = 292405,698812194.$$

$$\begin{aligned}
P_{LV} &= \frac{f \cdot \left(\left(\frac{R_{LV}P_{LV}}{f} \right)^{(1)} + \left(\frac{R_{LV}P_{LV}}{f} \right)^{(2)} \right)}{R_{LV}} = \\
&= 7,4296 \text{ Вт}.
\end{aligned}$$

Вираз для потужності втрат електроенергії з урахуванням попереднього розгляду можна записати так:

$$P_i = f \int_{t_2}^{T+t_1} \left[[V_0 + \Delta u_1(t)] \cdot \left[\frac{\Delta u_1(t)}{R_d + r} + I_0 \right] \right] dt +$$

$$+ f \int_{t_1}^{t_2} \left[[V_0 + \Delta u_2(t)] \cdot \left[\frac{\Delta u_2(t)}{R_d + r} + I_0 \right] \right] dt .$$

Перетворимо вираз P_i до наступного вигляду:

$$\frac{P_i}{f} = \left(\frac{P_i}{f} \right)^{(1)} + \left(\frac{P_i}{f} \right)^{(2)} =$$

$$= \int_{t_2}^{T+t_1} \left[V_0 I_0 + \Delta u_1(t) \left(I_0 + \frac{V_0}{R_d + r} \right) + \frac{(\Delta u_1(t))^2}{R_d + r} \right] dt +$$

$$+ \int_{t_1}^{t_2} \left[V_0 I_0 + \Delta u_2(t) \left(I_0 + \frac{V_0}{R_d + r} \right) + \frac{(\Delta u_2(t))^2}{R_d + r} \right] dt .$$

Після інтегрування кожного елемента отримаємо:

$$\left(\frac{P_i}{f} \right)^{(1)} = V_0 I_0 (T + t_1 - t_2) + \frac{I_0^{(1)} A_1}{p_1} \left[e^{p_1 (T+t_1-t_2)} - 1 \right] +$$

$$+ \frac{I_0^{(1)} A_2}{p_2} \left[e^{p_2 (T+t_1-t_2)} - 1 \right] + I_0^{(1)} \Delta u_s (T + t_1 - t_2) +$$

$$+ \frac{V_0^{(2)} A_1^2}{2 p_1} \left[e^{2 p_1 (T+t_1-t_2)} - 1 \right] + \frac{V_0^{(2)} A_2^2}{2 p_2} \times$$

$$\times \left[e^{2 p_2 (T+t_1-t_2)} - 1 \right] + V_0^{(2)} (\Delta u_s)^2 (T + t_1 - t_2) +$$

$$+ \frac{2 V_0^{(2)} A_1 A_2}{p_1 + p_2} \cdot \left[e^{(p_1 + p_2) (T+t_1-t_2)} - 1 \right] + \frac{2 V_0^{(2)} \Delta u_s A_1}{p_1} \times$$

$$\times \left[e^{p_1(T+t_1-t_2)} - 1 \right] + \frac{2V_0^{(2)}\Delta u_s A_2}{p_2} \left[e^{p_2(T+t_1-t_2)} - 1 \right]. \quad (25)$$

$$\begin{aligned} & \left(\frac{P_i}{f} \right)^{(2)} = V_0 I_0 (t_2 - t_1) + \frac{I_0^{(1)} A_3}{\omega} [\cos(\psi) - \\ & - \cos[\omega(t_2 - t_1) + \psi]] + \frac{I_0^{(1)} A_4}{p_3} \left[e^{p_3(t_2-t_1)} - 1 \right] + \\ & + \frac{I_0^{(1)} A_5}{p_4} \left[e^{p_4(t_2-t_1)} - 1 \right] + I_0^{(1)} \Delta u_s (t_2 - t_1) + V_0^{(2)} A_3^2 \times \\ & \times \left[\frac{1}{2} (t_2 - t_1) + \frac{1}{4\omega} [\sin(2\psi) - \sin(2(\omega(t_2 - t_1) + \psi))] \right] + \\ & + \frac{V_0^{(2)} A_4^2}{2p_3} \left[e^{2p_3(t_2-t_1)} - 1 \right] + \frac{V_0^{(2)} A_5^2}{2p_4} \left[e^{2p_4(t_2-t_1)} - 1 \right] + \\ & + V_0^{(2)} (\Delta u_s)^2 (t_2 - t_1) + \frac{2V_0^{(2)} A_3 A_4}{\omega \left[\left(\frac{p_3}{\omega} \right)^2 + 1 \right]} \left[e^{p_3(t_2-t_1)} \times \right. \\ & \times \left(\frac{p_3}{\omega} \sin[\omega(t_2 - t_1) + \psi] - \cos[\omega(t_2 - t_1) + \psi] \right) - \\ & - \frac{p_3}{\omega} \sin(\psi) + \cos(\psi) \left. \right] + \frac{2V_0^{(2)} A_3 A_5}{\omega \left[\left(\frac{p_4}{\omega} \right)^2 + 1 \right]} \left[e^{p_4(t_2-t_1)} \times \right. \\ & \times \left(\frac{p_4}{\omega} \sin[\omega(t_2 - t_1) + \psi] - \cos[\omega(t_2 - t_1) + \psi] \right) - \\ & - \frac{p_4}{\omega} \sin(\psi) + \cos(\psi) \left. \right] + \frac{2V_0^{(2)} \Delta u_s A_3}{\omega} [\cos(\psi) - \\ & - \cos[\omega(t_2 - t_1) + \psi]] + \frac{2V_0^{(2)} A_4 A_5}{p_3 + p_4} \left[e^{(p_3+p_4)(t_2-t_1)} - 1 \right] + \\ & + \frac{2V_0^{(2)} \Delta u_s A_4}{p_3} \left[e^{p_3(t_2-t_1)} - 1 \right] + \\ & + \frac{2V_0^{(2)} \Delta u_s A_5}{p_4} \left[e^{p_4(t_2-t_1)} - 1 \right], \end{aligned} \quad (26)$$

де $I_0^{(1)} = I_0 + V_0 / (R_d + r)$, $V_0^{(2)} = 1 / (R_d + r)$.

Відповідно отримаємо значення:

$$\left(\frac{P_i}{f} \right)^{(1)} = 2,8238082171 ,$$

$$\left(\frac{P_i}{f} \right)^{(2)} = 0,0499634373 .$$

$$P_i = \left(\left(\frac{P_i}{f} \right)^{(1)} + \left(\frac{P_i}{f} \right)^{(2)} \right) \cdot f =$$

$$= 143,6886 \text{ Вт} .$$

Потужність втрат електроенергії у активному опорі фільтра R_f може бути визначена з формули:

$$P_f = f \int_{t_2}^{T+t_1} [(i_{f1})^2 R_f] dt + f \int_{t_1}^{t_2} [(i_{f2})^2 R_f] dt ,$$

Зможемо перетворити вираз (20) до вигляду:

$$\frac{P_f}{R_f f} = \left(\frac{P_f}{R_f f} \right)^{(1)} + \left(\frac{P_f}{R_f f} \right)^{(2)} =$$

$$= \int_{t_2}^{T+t_1} \left(I_0^{(2)} + \Delta u_1(t) \left(\frac{1}{R_{LV}} + \frac{1}{R_d + r} \right) + C_3 \frac{d\Delta u_1(t)}{dt} \right)^2 dt +$$

$$+ \int_{t_1}^{t_2} \left(I_0^{(2)} + u_2(t) \left(\frac{1}{R_{LV}} + \frac{1}{R_d + r} \right) + C_3 \frac{d\Delta u_2(t)}{dt} \right)^2 dt ,$$

$$\text{де } I_0^{(2)} = I_0 + (U_0 + I_0 r) / R_{LV} .$$

Після інтегрування всіх компонентів отримуємо:

$$\begin{aligned} \left(\frac{P_3}{R_{ff}} \right)^{(1)} &= \left(I_0^{(3)} \right)^2 (T + t_1 - t_2) + \frac{X_4^2}{2p_1} \left[e^{2p_1(T+t_1-t_2)} - 1 \right] + \\ &+ \frac{X_5^2}{2p_2} \left[e^{2p_2(T+t_1-t_2)} - 1 \right] + \frac{2I_0^{(3)}X_4}{p_1} \left[e^{p_1(T+t_1-t_2)} - 1 \right] + \\ &+ \frac{2I_0^{(3)}X_5}{p_2} \left[e^{p_2(T+t_1-t_2)} - 1 \right] + \frac{2X_4X_5}{p_1 + p_2} \times \\ &\times \left[e^{(p_1+p_2)(T+t_1-t_2)} - 1 \right], \end{aligned} \quad (27)$$

$$\begin{aligned} \left(\frac{P_f}{R_{ff}} \right)^{(2)} &= \left(I_0^{(3)} \right)^2 (t_2 - t_1) + X_1^2 \left[\frac{1}{2} (t_2 - t_1) + \right. \\ &+ \left. \frac{1}{4\omega} [\sin(2\psi) - \sin 2[\omega(t_2 - t_1) + \psi]] \right] + (A_3 \omega C_3)^2 \times \\ &\times \left[\frac{1}{2} (t_2 - t_1) + \frac{1}{4\omega} [\sin(2[\omega(t_2 - t_1) + \psi]) - \sin(2\psi)] \right] + \\ &+ \frac{X_2^2}{2p_3} \left[e^{2p_3(t_2-t_1)} - 1 \right] + \frac{X_3^2}{2p_4} \left[e^{2p_4(t_2-t_1)} - 1 \right] + \\ &+ \frac{2I_0^{(3)}X_1}{\omega} [\cos(\psi) - \cos[\omega(t_2 - t_1) + \psi]] + \\ &+ 2I_0^{(3)}A_3C_3 [\sin[\omega(t_2 - t_1) + \psi] - \sin(\psi)] + \frac{2I_0^{(3)}X_2}{p_3} \times \\ &\times \left[e^{p_3(t_2-t_1)} - 1 \right] + \frac{2I_0^{(3)}X_3}{p_4} \left[e^{p_4(t_2-t_1)} - 1 \right] + \frac{X_1A_3C_3}{2} \times \\ &\times [\cos(2\psi) - \cos(2[\omega(t_2 - t_1) + \psi])] + \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& + \frac{2X_1X_2}{\omega \left[\left(\frac{p_3}{\omega} \right)^2 + 1 \right]} \left[e^{p_3(t_2-t_1)} \times \right. \\
& \times \left(\frac{p_3}{\omega} \sin[\omega(t_2-t_1)+\psi] - \cos[\omega(t_2-t_1)+\psi] \right) - \\
& \left. - \frac{p_3}{\omega} \sin(\psi) + \cos(\psi) \right] + \frac{2X_1X_3}{\omega \left[\left(\frac{p_4}{\omega} \right)^2 + 1 \right]} \left[e^{p_4(t_2-t_1)} \times \right. \\
& \times \left(\frac{p_4}{\omega} \sin[\omega(t_2-t_1)+\psi] - \cos[\omega(t_2-t_1)+\psi] \right) - \\
& \left. - \frac{p_4}{\omega} \sin \psi + \cos \psi \right] + \frac{2X_2A_3C_3}{\left(\frac{p_3}{\omega} \right)^2 + 1} \left[e^{p_3(t_2-t_1)} \times \right. \\
& \times \left(\frac{p_3}{\omega} \cos[\omega(t_2-t_1)+\psi] + \sin[\omega(t_2-t_1)+\psi] \right) - \\
& \left. - \frac{p_3}{\omega} \cos(\psi) - \sin(\psi) \right] + \frac{2X_3A_3C_3}{\left(\frac{p_4}{\omega} \right)^2 + 1} \left[e^{p_4(t_2-t_1)} \times \right. \\
& \times \left(\frac{p_4}{\omega} \cos[\omega(t_2-t_1)+\psi] + \sin[\omega(t_2-t_1)+\psi] \right) - \\
& \left. - \frac{p_4}{\omega} \cos(\psi) - \sin(\psi) \right] + \frac{2X_2X_3}{p_3+p_4} \times \\
& \times \left[e^{(p_3+p_4)(t_2-t_1)} - 1 \right]. \tag{28}
\end{aligned}$$

$$I_0^{(3)} = I_0^{(2)} + \Delta u_s \left(\frac{1}{R_{LV}} + \frac{1}{R_d + r} \right);$$

$$X_1 = A_3 \left(\frac{1}{R_{LV}} + \frac{1}{R_d + r} \right);$$

$$X_2 = A_4 \left(p_3 C_3 + \frac{1}{R_{LV}} + \frac{1}{R_d + r} \right);$$

$$X_3 = A_5 \left(p_4 C_3 + \frac{1}{R_{LV}} + \frac{1}{R_d + r} \right);$$

$$X_4 = A_1 \left(p_1 C_3 + \frac{1}{R_{LV}} + \frac{1}{R_d + r} \right);$$

$$X_5 = A_2 \left(p_2 C_3 + \frac{1}{R_{LV}} + \frac{1}{R_d + r} \right).$$

Отримуємо значення:

$$\left(\frac{P_3}{R_f f} \right)^{(1)} = 0,0000005425 ,$$

$$\left(\frac{P_3}{R_f f} \right)^{(2)} = 0,0000000102 .$$

$$\begin{aligned} P_f &= R_f \cdot f \cdot \left(\left(\frac{P_3}{R_f f} \right)^{(1)} + \left(\frac{P_3}{R_f f} \right)^{(2)} \right) = \\ &= 49,1817 \text{ Вт} \end{aligned}$$

Отже, після розрахунку заданих параметрів – ми отримали такі значення:

$$U_m = 22071,38 \text{ В},$$

$$\Delta t = 0,000353743 \text{ с.},$$

$$P_{LV} = 7,4296 \text{ Вт},$$

$$P_i = 143,6886 \text{ Вт},$$

$$P_f = 49,1817 \text{ Вт}.$$

Висновки до розділу 3.

У даному розділі був проведений розрахунок величин, що наведені у розділі 2 даної роботи для $C_2 = 0,072 \text{ мкФ}$.

Розраховані наступні величини:

- максимальна напруга;
- різниця часу;
- потужності при навантаженні;
- потужність втрат електроенергії;
- потужність втрат електроенергії в активному опорі фільтра.

Розділ 4. Дослідження зміни вихідних параметрів режиму випрямляча в залежності від значення фільтрової ємності

У даному розділі розрахунок проводиться однаковий з розрахунком у розділі 2, при цьому змінюючи параметр C_2 зменшуючи його щоразу на $0,012\text{мкФ}$, тобто значення C_2 буде рівним $0,072\text{мкФ}; 0,06\text{мкФ}; 0,048\text{мкФ}; 0,036\text{мкФ}; 0,024\text{мкФ}; 0,012\text{мкФ}$.

Нижче приведений розрахунок для $C_2 = 0,06\text{мкФ}$:

$$V_0 = 30\text{кВ}$$

$$U_0 = 29,7\text{кВ}$$

$$C_1 = 0,1\text{мкФ}$$

$$C_2 = 0,06\text{мкФ}$$

$$C_3 = 0,072\text{мкФ}$$

$$R_f = 1,78\text{МОм}$$

$$r = 60\text{кОм}$$

$$r_d = 22\text{Ом}$$

$$I_0 = 5\text{мА}$$

$$I_{LV} = 2,5\text{мА}$$

$$u_0 = 9\text{В}$$

$$f = 50\text{Гц}$$

$$\omega = 2\pi f$$

$$T = 0,02\text{с}$$

$$n = 3300\text{шт}$$

$$R_d = 72600\text{Ом}$$

Отримаю корені характеристичного рівняння $p^2 + a_1 p + a_2 = 0$ відповідно до формули (5):

$$\begin{aligned} p_1 &= -8,6608 \\ p_2 &= -113,3637 \end{aligned}$$

Розраховую корені рівняння відповідно до формул (8):

$$\begin{aligned} p_3 &= -3,2608 \\ p_4 &= -112,9117 \end{aligned}$$

Розраховуємо постійну складову напруги пульсації Δu_s :

$$\Delta u_{1s} = \Delta u_{2s} = \Delta u_s = - \frac{5 \cdot 10^{-3} + \left(\frac{1}{12 \cdot 10^7}\right) \cdot 30000}{\left(\frac{1}{12 \cdot 10^7}\right) + \left(\frac{1}{72600 + 60 \cdot 10^3}\right)} = -695,3816.$$

Розв'язую алгебраїчні рівняння (9) – (15).

ψ – приймаємо рівним:

$$\psi = \arctan\left(\frac{b_2 - \omega^2}{b_1 \omega}\right) = -1,2154.$$

Як і у розділі 3 для розрахунку A_1, A_2, A_3, A_4, A_5 , підбираємо значення Δt довільно. У даному розрахунку візьмемо значення $\Delta t = 0,0003944609$.

$$\omega A_3 \cos(\omega \Delta t + \psi) + p_3 A_4 e^{p_3 \Delta t} + p_4 A_5 e^{p_4 \Delta t} =$$

$$= p_1 A_1 + p_2 A_2 ;$$

$$\omega A_3 \cos(\psi) + p_3 A_4 + p_4 A_5 =$$

$$= p_1 A_1 e^{p_1(T-\Delta t)} + p_2 A_2 e^{p_2(T-\Delta t)} ;$$

$$A_3 \sin(\psi) + A_4 + A_5 = A_1 e^{p_1(T-\Delta t)} + A_2 e^{p_2(T-\Delta t)} ;$$

$$A_3 \sin(\omega \Delta t + \psi) + A_4 e^{p_3 \Delta t} + A_5 e^{p_4 \Delta t} = A_1 + A_2 ;$$

$$\frac{A_3}{\omega} (\cos(\psi) - \cos(\omega \Delta t + \psi)) = -\Delta u_s T -$$

$$-\frac{A_1}{p_1} (e^{p_1(T-\Delta t)} - 1) - \frac{A_2}{p_2} (e^{p_2(T-\Delta t)} - 1) -$$

$$-\frac{A_4}{p_3} (e^{p_3 \Delta t} - 1) - \frac{A_5}{p_4} (e^{p_4 \Delta t} - 1) .$$

Після розв'язку рівнянь отримуємо:

$$A_1 = 818,603$$

$$A_2 = -142,3063$$

$$A_3 = 329,7096$$

$$A_4 = 646,3721$$

$$A_5 = 338,0658$$

Отримавши значення A , розраховую значення F_1, F_2 . Формули для розрахунку вказані у розділі 3.

Розрахувавши значення F_1, F_2 , отримали :

$$F_1 = 38512,6736 ,$$

$$F_2 = 4362475,4338 .$$

Для розрахунку часу t_1, t_2 – потрібна напруга U_m . Виразимо її через рівняння A_3 :

$$A_3 = \frac{C_1 \omega U_m}{R_f C_3 (C_1 + C_2) \sqrt{b_1^2 \omega^2 + (b_2 - \omega^2)^2}} ,$$

отримуємо:

$$U_m = \frac{A_3 (R_f C_3 (C_1 + C_2))}{C_1 \omega} \cdot \frac{b_1^2 \omega^2 + (b_2 - \omega^2)^2}{b_1 \omega \sqrt{1 + \left(\frac{b_2 - \omega^2}{b_1 \omega}\right)^2}} =$$

$$= 22571,2789 \text{ В} .$$

Підставляємо дані величини у формули часу t_1, t_2 :

$$t_1 = \frac{1}{\omega} \arcsin \left(\frac{F_1}{U_m} - 1 \right) =$$

$$= \frac{1}{2\pi f} \arcsin \left(\frac{38512,6736}{22571,2789} - 1 \right) =$$

$$= 0,0024962309 \text{ с.},$$

та

$$t_2 = \frac{1}{\omega} \arccos \left(\frac{F_2}{\omega U_m} \right) =$$

$$= \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 50} \cdot \arccos\left(\frac{4362475,4338}{2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 22571,2789}\right) =$$

$$= 0,0028906918 \text{ с.}$$

Перевіримо значення Δt :

$$\Delta t = t_2 - t_1 =$$

$$= 0,0028906918 - 0,0024962309 =$$

$$= 0,0003944609 \text{ с.}$$

Перевіривши значення Δt можна зробити висновок, що дана схема зі зміною початкових даних працює.

Відповідно до формул (23) і (24) розраховую втрати потужності в навантаженні:

$$\left(\frac{R_{LV} P_{LV}}{f}\right)^{(1)} = 17491075,6271,$$

$$\left(\frac{R_{LV} P_{LV}}{f}\right)^{(2)} = 324910,4219.$$

$$P_{LV} = \frac{f \cdot \left(\left(\frac{R_{LV} P_{LV}}{f}\right)^{(1)} + \left(\frac{R_{LV} P_{LV}}{f}\right)^{(2)}\right)}{R_{LV}} =$$

$$= 7,4233 \text{ Вт.}$$

Потужність втрат електроенергії у активному опорі фільтра R_f отримуємо з формул (25) – (26):

$$\left(\frac{P_i}{f}\right)^{(1)} = 2,9324 ,$$

$$\left(\frac{P_i}{f}\right)^{(2)} = 0,0552 .$$

$$P_i = \left(\left(\frac{P_i}{f}\right)^{(1)} + \left(\frac{P_i}{f}\right)^{(2)}\right) \cdot f =$$

$$= 149,3823 \text{ Вт} .$$

Потужність втрат електроенергії у активному опорі фільтра R_f розраховую за формулами (27) –(28):

$$\left(\frac{P_3}{R_f f}\right)^{(1)} = 0,0000005418 ,$$

$$\left(\frac{P_3}{R_f f}\right)^{(2)} = 0,0000000116 .$$

$$P_f = R_f \cdot f \cdot \left(\left(\frac{P_3}{R_f f}\right)^{(1)} + \left(\frac{P_3}{R_f f}\right)^{(2)}\right) =$$

$$= 49,2505 \text{ Вт} .$$

Отже, після розрахунку заданих параметрів – ми отримали такі значення:

$$U_m = 22571,2789 \text{ В} ,$$

$$\Delta t = 0,0003944609 \text{ с} . ,$$

$$P_{LV} = 7,4233 \text{ Вт} ,$$

$$P_i = 149,3823 \text{ Вт} ,$$

$$P_f = 49,2505 \text{ Вт} .$$

У даному розрахунку змінюю значення C_2 з $0,072_{мкФ}$ на $0,06_{мкФ}$. Всі інші дані залишаються незмінними, розрахунок наведений нижче.

За аналогією отримую корені характеристичного рівняння $p^2 + a_1 p + a_2 = 0$ відповідно до формули (5):

$$\begin{aligned} p_1 &= -8,6608 \\ p_2 &= -113,3637 \end{aligned}$$

Розраховую корені рівняння відповідно до формул (8):

$$\begin{aligned} p_3 &= -3,2608 \\ p_4 &= -112,9117 \end{aligned}$$

Значення постійної складової напруги пульсації Δu_s рівне попередньому:

$$\Delta u_{1s} = \Delta u_{2s} = \Delta u_s = - \frac{5 \cdot 10^{-3} + (\frac{1}{12 \cdot 10^7}) \cdot 30000}{(\frac{1}{12 \cdot 10^7}) + (\frac{1}{72600 + 60 \cdot 10^3})} = -695,3816.$$

Розв'язую алгебраїчні рівняння (9) – (15).

ψ – приймаємо рівним:

$$\psi = \arctan\left(\frac{b_2 - \omega^2}{b_1 \omega}\right) = -1,2154.$$

Як і у розділі 3 для розрахунку A_1, A_2, A_3, A_4, A_5 , підбираємо значення Δt довільно. У даному розрахунку візьмемо значення $\Delta t = 0,0003944768$.

$$\begin{aligned} \omega A_3 \cos(\omega \Delta t + \psi) + p_3 A_4 e^{p_3 \Delta t} + p_4 A_5 e^{p_4 \Delta t} = \\ = p_1 A_1 + p_2 A_2; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \omega A_3 \cos(\psi) + p_3 A_4 + p_4 A_5 = \\ = p_1 A_1 e^{p_1(T-\Delta t)} + p_2 A_2 e^{p_2(T-\Delta t)}; \end{aligned}$$

$$A_3 \sin(\psi) + A_4 + A_5 = A_1 e^{p_1(T-\Delta t)} + A_2 e^{p_2(T-\Delta t)};$$

$$A_3 \sin(\omega \Delta t + \psi) + A_4 e^{p_3 \Delta t} + A_5 e^{p_4 \Delta t} = A_1 + A_2;$$

$$\frac{A_3}{\omega} (\cos(\psi) - \cos(\omega \Delta t + \psi)) = -\Delta u_s T -$$

$$-\frac{A_1}{p_1} (e^{p_1(T-\Delta t)} - 1) - \frac{A_2}{p_2} (e^{p_2(T-\Delta t)} - 1) -$$

$$-\frac{A_4}{p_3} (e^{p_3 \Delta t} - 1) - \frac{A_5}{p_4} (e^{p_4 \Delta t} - 1).$$

Після розв'язку рівнянь отримуємо:

$$A_1 = 818,603$$

$$A_2 = -142,3063$$

$$A_3 = 329,7096$$

$$A_4 = 646,3721$$

$$A_5 = 338,0658$$

Отримавши значення A , розраховую значення F_1, F_2 . Формули для розрахунку вказані у розділі 3.

Розрахувавши значення F_1, F_2 , отримали :

$$F_1 = 38512,7245,$$

$$F_2 = 4362503,8375.$$

Для розрахунку часу t_1, t_2 – визначаємо напругу U_m . Виразимо її через рівняння A_3 :

$$A_3 = \frac{C_1 \omega U_m}{R_f C_3 (C_1 + C_2) \sqrt{b_1^2 \omega^2 + (b_2 - \omega^2)^2}},$$

отримуємо:

$$U_m = \frac{A_3 (R_f C_3 (C_1 + C_2))}{C_1 \omega} \cdot \frac{b_1^2 \omega^2 + (b_2 - \omega^2)^2}{b_1 \omega \sqrt{1 + \left(\frac{b_2 - \omega^2}{b_1 \omega}\right)^2}} =$$

$$= 22571,3729 \text{ В}.$$

Підставляємо дані величини у формули часу t_1, t_2 :

$$t_1 = \frac{1}{\omega} \arcsin\left(\frac{F_1}{U_m} - 1\right) =$$

$$= \frac{1}{2\pi f} \arcsin\left(\frac{38512,7245}{22571,3729} - 1\right) =$$

$$= 0,0024962091 \text{ с.},$$

та

$$\begin{aligned}
 t_2 &= \frac{1}{\omega} \arccos\left(\frac{F_2}{\omega U_m}\right) = \\
 &= \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 50} \arccos\left(\frac{4362503,8375}{2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 22571,3729}\right) = \\
 &= 0,0028906859 \text{ с.}
 \end{aligned}$$

Перевіримо значення Δt :

$$\begin{aligned}
 \Delta t &= t_2 - t_1 = \\
 &= 0,0028906859 - 0,0024962091 = \\
 &= 0,0003944768 \text{ с.}
 \end{aligned}$$

Перевіривши значення Δt можна зробити висновок, що дана схема зі зміною початкових даних працює.

Відповідно до формул (23) і (24) розраховую втрати потужності в навантаженні:

$$\begin{aligned}
 \left(\frac{R_{LV} P_{LV}}{f}\right)^{(1)} &= 17491075,6271, \\
 \left(\frac{R_{LV} P_{LV}}{f}\right)^{(2)} &= 324910,4219. \\
 P_{LV} &= \frac{f \cdot \left(\left(\frac{R_{LV} P_{LV}}{f}\right)^{(1)} + \left(\frac{R_{LV} P_{LV}}{f}\right)^{(2)}\right)}{R_{LV}} =
 \end{aligned}$$

$$= 7,4233 \text{ Вт} .$$

Потужність втрат електроенергії у активному опорі фільтра R_f отримуємо з формул (25) – (26):

$$\left(\frac{P_i}{f} \right)^{(1)} = 2,9324 ,$$

$$\left(\frac{P_i}{f} \right)^{(2)} = 0,0552 .$$

$$P_i = \left(\left(\frac{P_i}{f} \right)^{(1)} + \left(\frac{P_i}{f} \right)^{(2)} \right) \cdot f =$$

$$= 149,3823 \text{ Вт} .$$

Потужність втрат електроенергії у активному опорі фільтра R_f розраховуємо за формулами (27) – (28):

$$\left(\frac{P_3}{R_f f} \right)^{(1)} = 0,0000005418 ,$$

$$\left(\frac{P_3}{R_f f} \right)^{(2)} = 0,0000000115 .$$

$$P_f = R_f \cdot f \cdot \left(\left(\frac{P_3}{R_f f} \right)^{(1)} + \left(\frac{P_3}{R_f f} \right)^{(2)} \right) =$$

$$= 49,2412 \text{ Вт} .$$

Отже, після розрахунку заданих параметрів – ми отримали такі значення:

$$U_m = 22571,3729 \text{ В},$$

$$\Delta t = 0,0003944768 \text{ с.},$$

$$P_{LV} = 7,4233 \text{ Вт},$$

$$P_i = 149,3823 \text{ Вт},$$

$$P_f = 49,2412 \text{ Вт}.$$

Зараз змінюю значення C_2 з $0,06\text{мкФ}$ на $0,048\text{мкФ}$. Всі інші дані залишаються незмінними, розрахунок наведений нижче.

Аналогічно отримую корені характеристичного рівняння $p^2 + a_1p + a_2 = 0$ відповідно до формули (5):

$$\begin{aligned} p_1 &= -10,8075 \\ p_2 &= -113,5579 \end{aligned}$$

Розраховую корені рівняння відповідно до формул (8):

$$\begin{aligned} p_3 &= -3,5245 \\ p_4 &= -112,9327 \end{aligned}$$

Значення постійної складової напруги пульсації Δu_s рівне попередньому:

$$\Delta u_{1s} = \Delta u_{2s} = \Delta u_s = -\frac{5 \cdot 10^{-3} + (\frac{1}{12 \cdot 10^7}) \cdot 30000}{(\frac{1}{12 \cdot 10^7}) + (\frac{1}{72600 + 60 \cdot 10^3})} = -695,3816.$$

Розв'язую алгебраїчні рівняння (9) – (15).

ψ – приймаємо рівним:

$$\psi = \arctan\left(\frac{b_2 - \omega^2}{b_1 \omega}\right) = -1,2154.$$

Як і у розділі 3 для розрахунку A_1, A_2, A_3, A_4, A_5 , підбираємо значення Δt довільно. У даному розрахунку візьмемо значення $\Delta t = 0,0004062524$.

$$\begin{aligned} \omega A_3 \cos(\omega \Delta t + \psi) + p_3 A_4 e^{p_3 \Delta t} + p_4 A_5 e^{p_4 \Delta t} = \\ = p_1 A_1 + p_2 A_2; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \omega A_3 \cos(\psi) + p_3 A_4 + p_4 A_5 = \\ = p_1 A_1 e^{p_1(T-\Delta t)} + p_2 A_2 e^{p_2(T-\Delta t)}; \end{aligned}$$

$$A_3 \sin(\psi) + A_4 + A_5 = A_1 e^{p_1(T-\Delta t)} + A_2 e^{p_2(T-\Delta t)};$$

$$A_3 \sin(\omega \Delta t + \psi) + A_4 e^{p_3 \Delta t} + A_5 e^{p_4 \Delta t} = A_1 + A_2;$$

$$\frac{A_3}{\omega} (\cos(\psi) - \cos(\omega \Delta t + \psi)) = -\Delta u_s T -$$

$$-\frac{A_1}{p_1} (e^{p_1(T-\Delta t)} - 1) - \frac{A_2}{p_2} (e^{p_2(T-\Delta t)} - 1) -$$

$$-\frac{A_4}{p_3} (e^{p_3 \Delta t} - 1) - \frac{A_5}{p_4} (e^{p_4 \Delta t} - 1).$$

Після розв'язку рівнянь отримуємо:

$$A_1 = 852,5383$$

$$A_2 = -180,6696$$

$$A_3 = 365,0578$$

$$A_4 = 631,7731$$

$$A_5 = 380,8502$$

Отримавши значення A , розраховую значення F_1, F_2 . Формули для розрахунку вказані у розділі 3.

Розраховували значення F_1, F_2 , отримали :

$$F_1 = 38315,074 ,$$

$$F_2 = 4820482,8313 .$$

Для розрахунку часу t_1, t_2 – визначаємо напругу U_m . Виразимо її через рівняння A_3 :

$$A_3 = \frac{C_1 \omega U_m}{R_f C_3 (C_1 + C_2) \sqrt{b_1^2 \omega^2 + (b_2 - \omega^2)^2}} ,$$

отримуємо:

$$U_m = \frac{A_3 (R_f C_3 (C_1 + C_2))}{C_1 \omega} \cdot \frac{b_1^2 \omega^2 + (b_2 - \omega^2)^2}{b_1 \omega \sqrt{1 + \left(\frac{b_2 - \omega^2}{b_1 \omega}\right)^2}} =$$

$$= 23117,6042 \text{ В} .$$

Підставляємо дані величини у формули часу t_1, t_2 :

$$t_1 = \frac{1}{\omega} \arcsin \left(\frac{F_1}{U_m} - 1 \right) =$$

$$= \frac{1}{2\pi f} \arcsin \left(\frac{38315,074}{23117,6042} - 1 \right) =$$

$$= 0,00228343 \text{ с.},$$

та

$$\begin{aligned} t_2 &= \frac{1}{\omega} \arccos\left(\frac{F_2}{\omega U_m}\right) = \\ &= \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 50} \cdot \arccos\left(\frac{4362475,4338}{2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 22571,2789}\right) = \\ &= 0,0026896824 \text{ с.} \end{aligned}$$

Перевіримо значення Δt :

$$\begin{aligned} \Delta t &= t_2 - t_1 = \\ &= 0,0026896824 - 0,00228343 = \\ &= 0,0004062524 \text{ с.} \end{aligned}$$

Перевіливши значення Δt можна зробити висновок, що дана схема зі зміною початкових параметрів працює.

Відповідно до формул (23) і (24) розраховую втрати потужності в навантаженні:

$$\begin{aligned} \left(\frac{R_{LV} P_{LV}}{f}\right)^{(1)} &= 17466014,4968, \\ \left(\frac{R_{LV} P_{LV}}{f}\right)^{(2)} &= 332987,9656. \\ P_{LV} &= \frac{f \cdot \left(\left(\frac{R_{LV} P_{LV}}{f}\right)^{(1)} + \left(\frac{R_{LV} P_{LV}}{f}\right)^{(2)}\right)}{R_{LV}} = \end{aligned}$$

$$= 7,4163 \text{ Вт}.$$

Потужність втрат електроенергії у активному опорі фільтра R_f отримуємо з формул (25) – (26):

$$\left(\frac{P_i}{f}\right)^{(1)} = 3,0977 ,$$

$$\left(\frac{P_i}{f}\right)^{(2)} = 0,0558.$$

$$P_i = \left(\left(\frac{P_i}{f}\right)^{(1)} + \left(\frac{P_i}{f}\right)^{(2)}\right) \cdot f =$$

$$= 157,6729 \text{ Вт}.$$

Потужність втрат електроенергії у активному опорі фільтра R_f розраховуємо за формулами (27) – (28):

$$\left(\frac{P_3}{R_f f}\right)^{(1)} = 0,000000542 ,$$

$$\left(\frac{P_3}{R_f f}\right)^{(2)} = 0,0000000118 .$$

$$P_f = R_f \cdot f \cdot \left(\left(\frac{P_3}{R_f f}\right)^{(1)} + \left(\frac{P_3}{R_f f}\right)^{(2)}\right) =$$

$$= 49,2884 \text{ Вт}.$$

Отже, після розрахунку заданих параметрів – ми отримали такі значення:

$$U_m = 23117,6042 \text{ В},$$

$$\Delta t = 0,0004062524 \text{ с.},$$

$$P_{LV} = 7,4163 \text{ Вт},$$

$$P_i = 157,6729 \text{ Вт},$$

$$P_f = 49,2884 \text{ Вт}.$$

Значення C_2 змінюю з $0,048_{\text{мкФ}}$ на $0,036_{\text{мкФ}}$. Всі інші дані залишаються незмінними, розрахунок наведений нижче.

Отримуємо корені характеристичного рівняння $p^2 + a_1 p + a_2 = 0$ відповідно до формули (5):

$$\begin{aligned} p_1 &= -14,3667 \\ p_2 &= -113,9 \end{aligned}$$

Розраховуємо корені рівняння відповідно до формул (8):

$$\begin{aligned} p_3 &= -3,8347 \\ p_4 &= -112,9574 \end{aligned}$$

Значення постійної складової напруги пульсації Δu_s рівне попередньому:

$$\Delta u_{1s} = \Delta u_{2s} = \Delta u_s = -\frac{5 \cdot 10^{-3} + (\frac{1}{12 \cdot 10^7}) \cdot 30000}{(\frac{1}{12 \cdot 10^7}) + (\frac{1}{72600 + 60 \cdot 10^3})} = -695,3816.$$

Розв'язую алгебраїчні рівняння (9) – (15).

ψ – приймаємо рівним:

$$\psi = \arctan\left(\frac{b_2 - \omega^2}{b_1 \omega}\right) = -1,2154.$$

Як і у розділі 3 для розрахунку A_1, A_2, A_3, A_4, A_5 , підбираємо значення Δt довільно. У даному розрахунку візьмемо значення $\Delta t = 0,0005117385$.

$$\begin{aligned} \omega A_3 \cos(\omega \Delta t + \psi) + p_3 A_4 e^{p_3 \Delta t} + p_4 A_5 e^{p_4 \Delta t} = \\ = p_1 A_1 + p_2 A_2; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \omega A_3 \cos(\psi) + p_3 A_4 + p_4 A_5 = \\ = p_1 A_1 e^{p_1(T-\Delta t)} + p_2 A_2 e^{p_2(T-\Delta t)}; \end{aligned}$$

$$A_3 \sin(\psi) + A_4 + A_5 = A_1 e^{p_1(T-\Delta t)} + A_2 e^{p_2(T-\Delta t)};$$

$$A_3 \sin(\omega \Delta t + \psi) + A_4 e^{p_3 \Delta t} + A_5 e^{p_4 \Delta t} = A_1 + A_2;$$

$$\frac{A_3}{\omega} (\cos(\psi) - \cos(\omega \Delta t + \psi)) = -\Delta u_s T -$$

$$-\frac{A_1}{p_1} (e^{p_1(T-\Delta t)} - 1) - \frac{A_2}{p_2} (e^{p_2(T-\Delta t)} - 1) -$$

$$-\frac{A_4}{p_3} (e^{p_3 \Delta t} - 1) - \frac{A_5}{p_4} (e^{p_4 \Delta t} - 1).$$

Після розв'язку рівнянь отримуємо:

$$A_1 = 912,1683$$

$$A_2 = -247,4345$$

$$A_3 = 415,8601$$

$$A_4 = 607,5992$$

$$A_5 = 444,5358$$

Отримавши значення A , розрахуємо значення F_1, F_2 . Формули для розрахунку вказані у розділі 3.

Розрахувавши значення F_1, F_2 , отримали :

$$F_1 = 37994,0152 ,$$

$$F_2 = 5472658,6326 .$$

Для розрахунку часу t_1, t_2 – отримуємо напругу U_m . Виразимо її через рівняння A_3 :

$$A_3 = \frac{C_1 \omega U_m}{R_f C_3 (C_1 + C_2) \sqrt{b_1^2 \omega^2 + (b_2 - \omega^2)^2}} ,$$

отримуємо:

$$\begin{aligned} U_m &= \frac{A_3 (R_f C_3 (C_1 + C_2))}{C_1 \omega} \cdot \frac{b_1^2 \omega^2 + (b_2 - \omega^2)^2}{b_1 \omega \sqrt{1 + \left(\frac{b_2 - \omega^2}{b_1 \omega}\right)^2}} = \\ &= 24200,3502 \text{ В} . \end{aligned}$$

Підставляємо дані величини у формули часу t_1, t_2 :

$$\begin{aligned} t_1 &= \frac{1}{\omega} \arcsin \left(\frac{F_1}{U_m} - 1 \right) = \\ &= \frac{1}{2\pi f} \arcsin \left(\frac{37994,0152}{24200,3502} - 1 \right) = \\ &= 0,0019304825 \text{ с.}, \end{aligned}$$

та

$$\begin{aligned}
 t_2 &= \frac{1}{\omega} \arccos\left(\frac{F_2}{\omega U_m}\right) = \\
 &= \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 50} \cdot \arccos\left(\frac{5472658,6326}{2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 24200,3502}\right) = \\
 &= 0,002442221 \text{ с.}
 \end{aligned}$$

Перевіримо значення Δt :

$$\begin{aligned}
 \Delta t &= t_2 - t_1 = \\
 &= 0,002442221 - 0,0019304825 = \\
 &= 0,0005117385 \text{ с.}
 \end{aligned}$$

Перевіривши значення Δt можна зробити висновок, що дана схема зі зміною початкових параметрів працює.

Відповідно до формул (23) і (24) розраховую втрати потужності в навантаженні:

$$\begin{aligned}
 \left(\frac{R_{LV} P_{LV}}{f}\right)^{(1)} &= 17346478,503, \\
 \left(\frac{R_{LV} P_{LV}}{f}\right)^{(2)} &= 417048,5207. \\
 P_{LV} &= \frac{f \cdot \left(\left(\frac{R_{LV} P_{LV}}{f}\right)^{(1)} + \left(\frac{R_{LV} P_{LV}}{f}\right)^{(2)}\right)}{R_{LV}} =
 \end{aligned}$$

$$= 7,4015 \text{ Вт}.$$

Потужність втрат електроенергії у активному опорі фільтра R_f отримую з формул (25) – (26):

$$\left(\frac{P_i}{f}\right)^{(1)} = 3,3965 ,$$

$$\left(\frac{P_i}{f}\right)^{(2)} = 0,0692 .$$

$$P_i = \left(\left(\frac{P_i}{f}\right)^{(1)} + \left(\frac{P_i}{f}\right)^{(2)}\right) \cdot f =$$

$$= 173,2808 \text{ Вт} .$$

Потужність втрат електроенергії у активному опорі фільтра R_f розраховую за формулами (27) –(28):

$$\left(\frac{P_3}{R_f f}\right)^{(1)} = 0,0000005409 ,$$

$$\left(\frac{P_3}{R_f f}\right)^{(2)} = 0,0000000155 .$$

$$P_f = R_f \cdot f \cdot \left(\left(\frac{P_3}{R_f f}\right)^{(1)} + \left(\frac{P_3}{R_f f}\right)^{(2)}\right) =$$

$$= 49,522 \text{ Вт} .$$

Отже, після розрахунку заданих параметрів – ми отримали такі значення:

$$U_m = 24200,3502 \text{ В},$$

$$\Delta t = 0,0005117385 \text{ с.},$$

$$P_{LV} = 7,4015 \text{ Вт},$$

$$P_i = 173,2808 \text{ Вт},$$

$$P_f = 49,522 \text{ Вт}.$$

Значення C_2 змінюю з $0,036_{\text{мкФ}}$ на $0,024_{\text{мкФ}}$. Всі інші дані залишаються незмінними, розрахунок наведений нижче.

Отримуємо корені характеристичного рівняння $p^2 + a_1 p + a_2 = 0$ відповідно до формули (5):

$$\begin{aligned} p_1 &= -21,4067 \\ p_2 &= -114,6628 \end{aligned}$$

Розраховуємо корені рівняння відповідно до формул (8):

$$\begin{aligned} p_3 &= -4,2047 \\ p_4 &= -112,9872 \end{aligned}$$

Значення постійної складової напруги пульсації Δu_s рівне попередньому:

$$\Delta u_{1s} = \Delta u_{2s} = \Delta u_s = -\frac{5 \cdot 10^{-3} + \left(\frac{1}{12 \cdot 10^7}\right) \cdot 30000}{\left(\frac{1}{12 \cdot 10^7}\right) + \left(\frac{1}{72600 + 60 \cdot 10^3}\right)} = -695,3816.$$

Розв'язую алгебраїчні рівняння (9) – (15).

ψ – приймаємо рівним:

$$\psi = \arctan\left(\frac{b_2 - \omega^2}{b_1 \omega}\right) = -1,2154.$$

Як і у розділі 3 для розрахунку A_1, A_2, A_3, A_4, A_5 , підбираємо значення Δt довільно. У даному розрахунку візьмемо значення $\Delta t = 0,0006542956$.

$$\omega A_3 \cos(\omega \Delta t + \psi) + p_3 A_4 e^{p_3 \Delta t} + p_4 A_5 e^{p_4 \Delta t} =$$

$$= p_1 A_1 + p_2 A_2 ;$$

$$\omega A_3 \cos(\psi) + p_3 A_4 + p_4 A_5 =$$

$$= p_1 A_1 e^{p_1(T-\Delta t)} + p_2 A_2 e^{p_2(T-\Delta t)} ;$$

$$A_3 \sin(\psi) + A_4 + A_5 = A_1 e^{p_1(T-\Delta t)} + A_2 e^{p_2(T-\Delta t)} ;$$

$$A_3 \sin(\omega \Delta t + \psi) + A_4 e^{p_3 \Delta t} + A_5 e^{p_4 \Delta t} = A_1 + A_2 ;$$

$$\frac{A_3}{\omega} (\cos(\psi) - \cos(\omega \Delta t + \psi)) = -\Delta u_s T -$$

$$-\frac{A_1}{p_1} (e^{p_1(T-\Delta t)} - 1) - \frac{A_2}{p_2} (e^{p_2(T-\Delta t)} - 1) -$$

$$-\frac{A_4}{p_3} (e^{p_3 \Delta t} - 1) - \frac{A_5}{p_4} (e^{p_4 \Delta t} - 1) .$$

Після розв'язку рівнянь отримуємо:

$$A_1 = 1043,6975$$

$$A_2 = -392,1961$$

$$A_3 = 486,118$$

$$A_4 = 561,4302$$

$$A_5 = 540,9027$$

Отримавши значення A , розраховую значення F_1, F_2 . Формули для розрахунку вказані у розділі 3.

Розрахувавши значення F_1, F_2 , отримали :

$$F_1 = 37383,1585,$$

$$F_2 = 6343922,1979.$$

Для розрахунку часу t_1, t_2 – отримуємо напругу U_m . Виразимо її через рівняння A_3 :

$$A_3 = \frac{C_1 \omega U_m}{R_f C_3 (C_1 + C_2) \sqrt{b_1^2 \omega^2 + (b_2 - \omega^2)^2}},$$

отримуємо:

$$U_m = \frac{A_3 (R_f C_3 (C_1 + C_2))}{C_1 \omega} \cdot \frac{b_1^2 \omega^2 + (b_2 - \omega^2)^2}{b_1 \omega \sqrt{1 + \left(\frac{b_2 - \omega^2}{b_1 \omega}\right)^2}} =$$

$$= 25793,9896 \text{ В}.$$

Підставляємо дані величини у формули часу t_1, t_2 :

$$t_1 = \frac{1}{\omega} \arcsin\left(\frac{F_1}{U_m} - 1\right) =$$

$$= \frac{1}{2\pi f} \arcsin\left(\frac{37383,1585}{25793,9896} - 1\right) =$$

$$= 0,0014832559 \text{ с.},$$

та

$$\begin{aligned}
 t_2 &= \frac{1}{\omega} \arccos\left(\frac{F_2}{\omega U_m}\right) = \\
 &= \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 50} \arccos\left(\frac{6343922,1979}{2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 25793,9896}\right) = \\
 &= 0,0021375515 \text{ с.}
 \end{aligned}$$

Перевіримо значення Δt :

$$\begin{aligned}
 \Delta t &= t_2 - t_1 = \\
 &= 0,0021375515 - 0,0014832559 = \\
 &= 0,0006542956 \text{ с.}
 \end{aligned}$$

Перевіривши значення Δt можна зробити висновок, що дана схема зі зміною початкових параметрів працює.

Відповідно до формул (23) і (24) розраховую втрати потужності в навантаженні:

$$\begin{aligned}
 \left(\frac{R_{LV} P_{LV}}{f}\right)^{(1)} &= 17176573,6507, \\
 \left(\frac{R_{LV} P_{LV}}{f}\right)^{(2)} &= 528790,7915. \\
 P_{LV} &= \frac{f \cdot \left(\left(\frac{R_{LV} P_{LV}}{f}\right)^{(1)} + \left(\frac{R_{LV} P_{LV}}{f}\right)^{(2)}\right)}{R_{LV}} =
 \end{aligned}$$

$$= 7,3772 \text{ Вт}.$$

Потужність втрат електроенергії у активному опорі фільтра R_f отримую з формул (25) – (26):

$$\left(\frac{P_i}{f}\right)^{(1)} = 4,0088 ,$$

$$\left(\frac{P_i}{f}\right)^{(2)} = 0,0855.$$

$$P_i = \left(\left(\frac{P_i}{f}\right)^{(1)} + \left(\frac{P_i}{f}\right)^{(2)}\right) \cdot f =$$

$$= 204,7138 \text{ Вт}.$$

Потужність втрат електроенергії у активному опорі фільтра R_f розраховую за формулами (27) –(28):

$$\left(\frac{P_3}{R_f f}\right)^{(1)} = 0,0000005413 ,$$

$$\left(\frac{P_3}{R_f f}\right)^{(2)} = 0,0000000211.$$

$$P_f = R_f \cdot f \cdot \left(\left(\frac{P_3}{R_f f}\right)^{(1)} + \left(\frac{P_3}{R_f f}\right)^{(2)}\right) =$$

$$= 50,0549 \text{ Вт}.$$

Отже, після розрахунку заданих параметрів – ми отримали такі значення:

$$U_m = 25793,9896 \text{ В},$$

$$\Delta t = 0,0006542956 \text{ с.},$$

$$P_{LV} = 7,3772 \text{ Вт},$$

$$P_i = 204,7138 \text{ Вт},$$

$$P_f = 50,0549 \text{ Вт}.$$

Значення C_2 змінюю з $0,024_{мкФ}$ на $0,012_{мкФ}$. Всі інші дані залишаються незмінними, розрахунок наведений нижче.

Отримую корені характеристичного рівняння $p^2 + a_1 p + a_2 = 0$ відповідно до формули (5):

$$\begin{aligned} p_1 &= -41,6708 \\ p_2 &= -117,807 \end{aligned}$$

Розраховую корені рівняння відповідно до формул (8):

$$\begin{aligned} p_3 &= -4,6537 \\ p_4 &= -113,0236 \end{aligned}$$

Значення постійної складової напруги пульсації Δu_s рівне попередньому:

$$\Delta u_{1s} = \Delta u_{2s} = \Delta u_s = -\frac{5 \cdot 10^{-3} + (\frac{1}{12 \cdot 10^7}) \cdot 30000}{(\frac{1}{12 \cdot 10^7}) + (\frac{1}{72600 + 60 \cdot 10^3})} = -695,3816.$$

Розв'язую алгебраїчні рівняння (9) – (15).

ψ – приймаємо рівним:

$$\psi = \arctan\left(\frac{b_2 - \omega^2}{b_1 \omega}\right) = -1,2154.$$

Як і у розділі 3 для розрахунку A_1, A_2, A_3, A_4, A_5 , підбираємо значення Δt довільно. У даному розрахунку візьмемо значення $\Delta t = 0,0010548414$.

$$\omega A_3 \cos(\omega \Delta t + \psi) + p_3 A_4 e^{p_3 \Delta t} + p_4 A_5 e^{p_4 \Delta t} =$$

$$= p_1 A_1 + p_2 A_2 ;$$

$$\omega A_3 \cos(\psi) + p_3 A_4 + p_4 A_5 =$$

$$= p_1 A_1 e^{p_1(T-\Delta t)} + p_2 A_2 e^{p_2(T-\Delta t)} ;$$

$$A_3 \sin(\psi) + A_4 + A_5 = A_1 e^{p_1(T-\Delta t)} + A_2 e^{p_2(T-\Delta t)} ;$$

$$A_3 \sin(\omega \Delta t + \psi) + A_4 e^{p_3 \Delta t} + A_5 e^{p_4 \Delta t} = A_1 + A_2 ;$$

$$\frac{A_3}{\omega} (\cos(\psi) - \cos(\omega \Delta t + \psi)) = -\Delta u_s T -$$

$$-\frac{A_1}{p_1} (e^{p_1(T-\Delta t)} - 1) - \frac{A_2}{p_2} (e^{p_2(T-\Delta t)} - 1) -$$

$$-\frac{A_4}{p_3} (e^{p_3 \Delta t} - 1) - \frac{A_5}{p_4} (e^{p_4 \Delta t} - 1) .$$

Після розв'язку рівнянь отримуємо:

$$A_1 = 1551,6584$$

$$A_2 = -931,7078$$

$$A_3 = 599,4544$$

$$A_4 = 440,881$$

$$A_5 = 724,6228$$

Отримавши значення A , розраховую значення F_1, F_2 . Формули для розрахунку вказані у розділі 3.

Розраховували значення F_1, F_2 , отримали :

$$F_1 = 35779,7199 ,$$

$$F_2 = 7553799,9795 .$$

Для розрахунку часу t_1, t_2 – отримуємо напругу U_m . Виразимо її через рівняння A_3 :

$$A_3 = \frac{C_1 \omega U_m}{R_f C_3 (C_1 + C_2) \sqrt{b_1^2 \omega^2 + (b_2 - \omega^2)^2}} ,$$

отримуємо:

$$U_m = \frac{A_3 (R_f C_3 (C_1 + C_2))}{C_1 \omega} \cdot \frac{b_1^2 \omega^2 + (b_2 - \omega^2)^2}{b_1 \omega \sqrt{1 + \left(\frac{b_2 - \omega^2}{b_1 \omega}\right)^2}} =$$

$$= 28731,2179 \text{ В} .$$

Підставляємо дані величини у формули часу t_1, t_2 :

$$t_1 = \frac{1}{\omega} \arcsin \left(\frac{F_1}{U_m} - 1 \right) =$$

$$= \frac{1}{2\pi f} \arcsin \left(\frac{35779,7199}{28731,2179} - 1 \right) =$$

$$= 0,0007889485 \text{ с.},$$

та

$$\begin{aligned}
 t_2 &= \frac{1}{\omega} \arccos\left(\frac{F_2}{\omega U_m}\right) = \\
 &= \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 50} \arccos\left(\frac{7553799,9795}{2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 28731,2179}\right) = \\
 &= 0,0018437899 \text{ с.}
 \end{aligned}$$

Перевіримо значення Δt :

$$\begin{aligned}
 \Delta t &= t_2 - t_1 = \\
 &= 0,0018437899 - 0,0007889485 = \\
 &= 0,0010548414 \text{ с.}
 \end{aligned}$$

Перевіривши значення Δt можна зробити висновок, що дана схема зі зміною початкових параметрів працює.

Відповідно до формул (23) і (24) розраховую втрати потужності в навантаженні:

$$\begin{aligned}
 \left(\frac{R_{LV} P_{LV}}{f}\right)^{(1)} &= 16732973,3429, \\
 \left(\frac{R_{LV} P_{LV}}{f}\right)^{(2)} &= 841943,7798. \\
 P_{LV} &= \frac{f \cdot \left(\left(\frac{R_{LV} P_{LV}}{f}\right)^{(1)} + \left(\frac{R_{LV} P_{LV}}{f}\right)^{(2)}\right)}{R_{LV}} =
 \end{aligned}$$

$$= 7,3229 \text{ Вт}.$$

Потужність втрат електроенергії у активному опорі фільтра R_f отримуємо з формул (25) – (26):

$$\left(\frac{P_i}{f}\right)^{(1)} = 6,099 ,$$

$$\left(\frac{P_i}{f}\right)^{(2)} = 0,1273 .$$

$$P_i = \left(\left(\frac{P_i}{f}\right)^{(1)} + \left(\frac{P_i}{f}\right)^{(2)}\right) \cdot f =$$

$$= 311,3126 \text{ Вт} .$$

Потужність втрат електроенергії у активному опорі фільтра R_f розраховуємо за формулами (27) – (28):

$$\left(\frac{P_3}{R_f f}\right)^{(1)} = 0,000000551 ,$$

$$\left(\frac{P_3}{R_f f}\right)^{(2)} = 0,0000000413 .$$

$$P_f = R_f \cdot f \cdot \left(\left(\frac{P_3}{R_f f}\right)^{(1)} + \left(\frac{P_3}{R_f f}\right)^{(2)}\right) =$$

$$= 52,7108 \text{ Вт} .$$

Отже, після розрахунку заданих параметрів – ми отримали такі значення:

$$U_m = 28731,2179 \text{ В},$$

$$\Delta t = 0,0010548414 \text{ с.},$$

$$P_{LV} = 7,3229 \text{ Вт},$$

$$P_i = 311,3126 \text{ Вт},$$

$$P_f = 52,7108 \text{ Вт}.$$

Висновки до розділу 4.

У даному розділі був проведений розрахунок величин, що наведені у розділі 2 даної роботи для $C_2 = 0,06 \text{ мкФ}; 0,048 \text{ мкФ}; 0,036 \text{ мкФ}; 0,024 \text{ мкФ}; 0,012 \text{ мкФ}$.

Розраховані наступні величини:

- максимальна напруга;
- різниця часу;
- потужності при навантаженні;
- потужність втрат електроенергії;
- потужність втрат електроенергії в активному опорі фільтра.

Розділ 5. Дослідження зміни вторинних параметрів режиму випрямляча в залежності від значення фільтрової ємності

В даному розділі роботи розглянемо зміни параметрів режиму випрямляча в залежності від значень фільтрової ємності. Побудуємо та виконаємо характеристику графіків та залежностей параметрів у залежності від значень фільтрової ємності.

Розглянемо залежність Δt (часу зарядження конденсатора C_2) від ємності конденсатора C_2 (рис. 5.1)

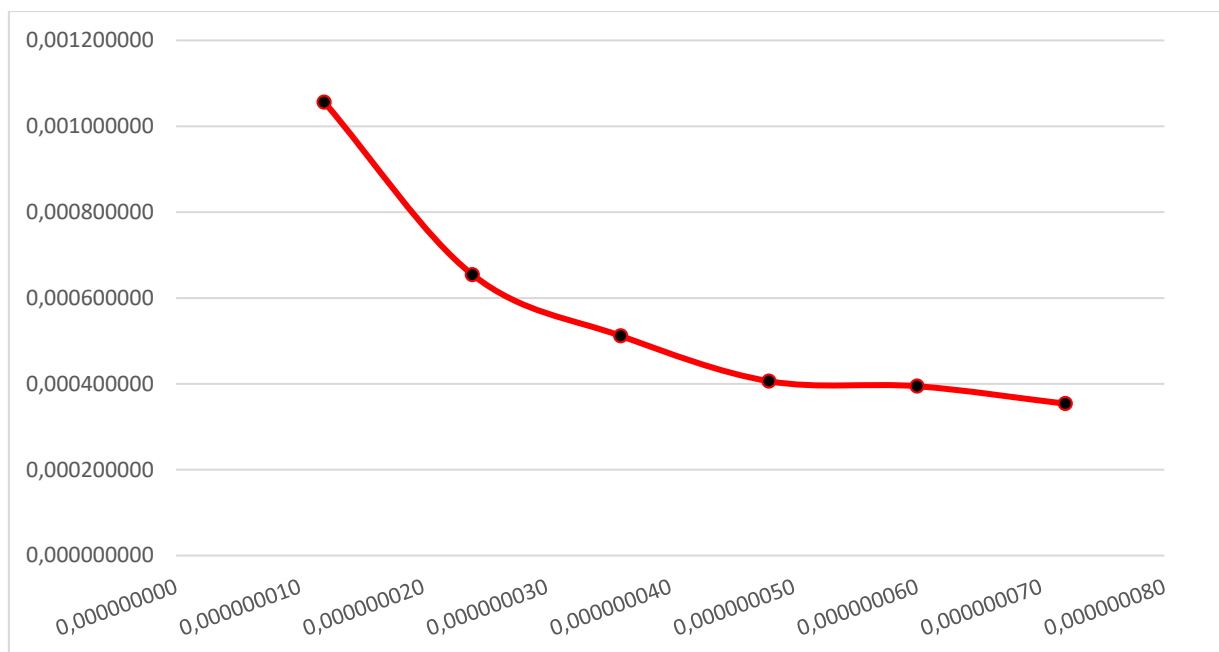


Рис. 5.1 Графік залежності Δt від C_2

З графіку, що зображений на рис. 5.1 ми бачимо, що зі збільшенням ємності конденсатора C_2 , час зарядження даного конденсатора зменшується. Стрімка зміна часу видна у діапазоні ємностей від $0,012 \text{ мкФ}$ до $0,048 \text{ мкФ}$.

Після значення ємності $0,048\text{мкФ}$ до $0,072\text{мкФ}$ прослідковується незначна зміна часу зарядження конденсатора C_2 .

На наступному рисунку (рис. 5.2) зображена залежність максимальної напруги U_m від значення ємності конденсатора C_2 .

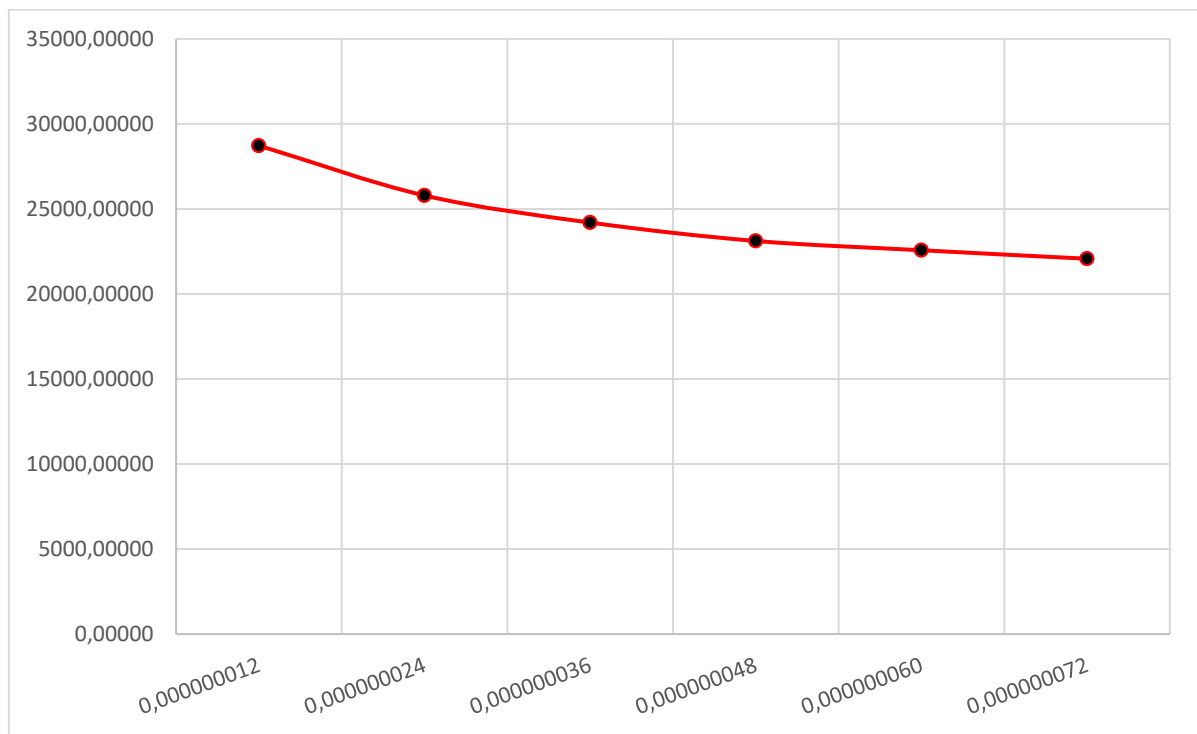


Рис. 5.2 Графік залежності U_m від C_2

З графіку залежності на рис. 5.2 можна помітити, що зі збільшенням ємності конденсатора C_2 зменшується напруга U_m . Даний фактор свідчить про те, що для зарядження конденсатора ємністю $0,012\text{мкФ}$ потрібна більша напруга, ніж для зарядження конденсатора ємністю $0,072\text{мкФ}$. Стрімке падіння напруги спостерігається на конденсаторах ємністю від $0,012\text{мкФ}$ до $0,048\text{мкФ}$. На відрізку від $0,048\text{мкФ}$ до $0,072\text{мкФ}$ спостерігається незначне падіння напруги U_m .

Наступний графік (рис. 5.3) показує залежність втрати потужності (P_{LV}) при навантаженні R_{LV} від значення ємності конденсатора C_2 .

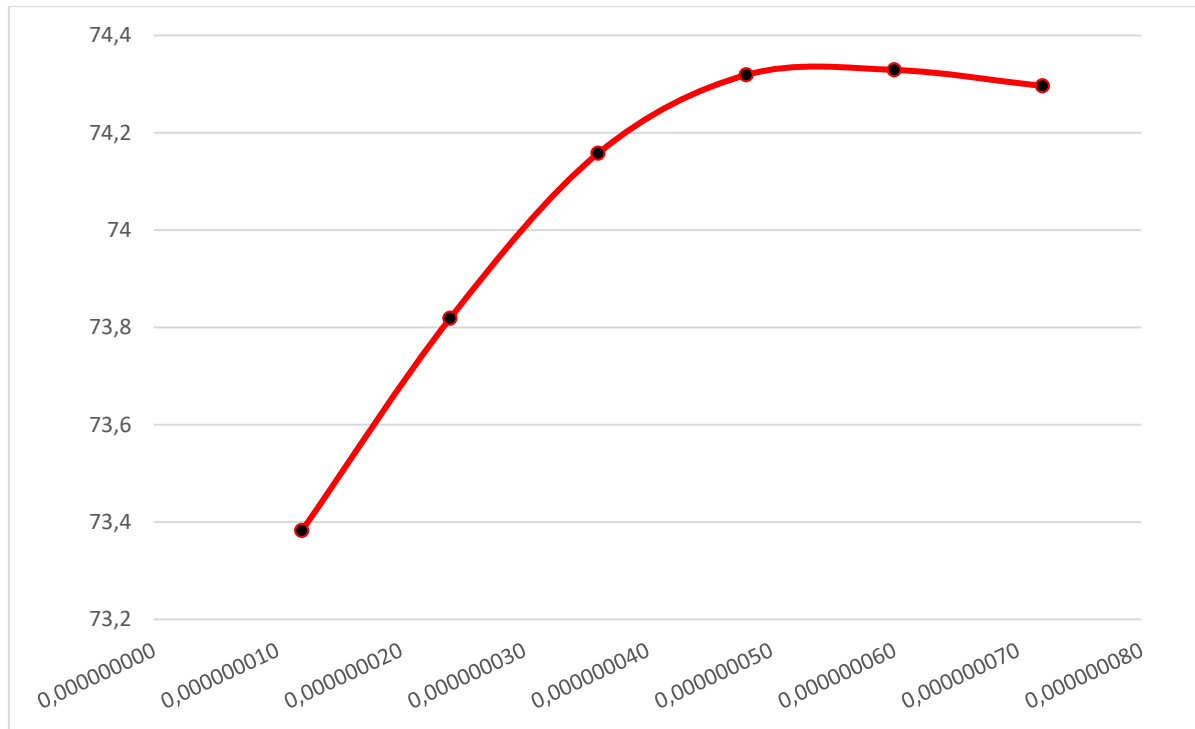


Рис. 5.3 Графік залежності P_{LV} від C_2

На графіку (рис. 5.3) помітно, що зі збільшенням ємності конденсатора C_2 втрати потужності при навантаженні зростають прямо пропорційно. Різка зміна втрат спостерігається на ємності від $0,012\text{мкФ}$ до $0,048\text{мкФ}$. Після позначки у $0,048\text{мкФ}$ крива втрат вирівнюється, а на відрізку від $0,06\text{мкФ}$ до $0,072\text{мкФ}$ навіть спадає.

На графіку, що зображений на рисунку 5.4 зображена залежність втрат електроенергії в групі елементів $ZD_1...ZD_n$, r від ємності конденсатора C_2 .

З графіка (рис. 5.4) можна зробити висновок, що при збільшенні ємності конденсатора C_2 втрати електроенергії в групі елементів $ZD_1...ZD_n$, r

зменшуються. Різке падіння втрат спостерігається при значенні ємності від $0,012\text{мкФ}$ до $0,048\text{мкФ}$. На відрізку кривої втрат, ємність якої складає від $0,048\text{мкФ}$ до $0,072\text{мкФ}$, втрати вирівнюються і на позначці $0,072\text{мкФ}$ мають мінімальне значення.

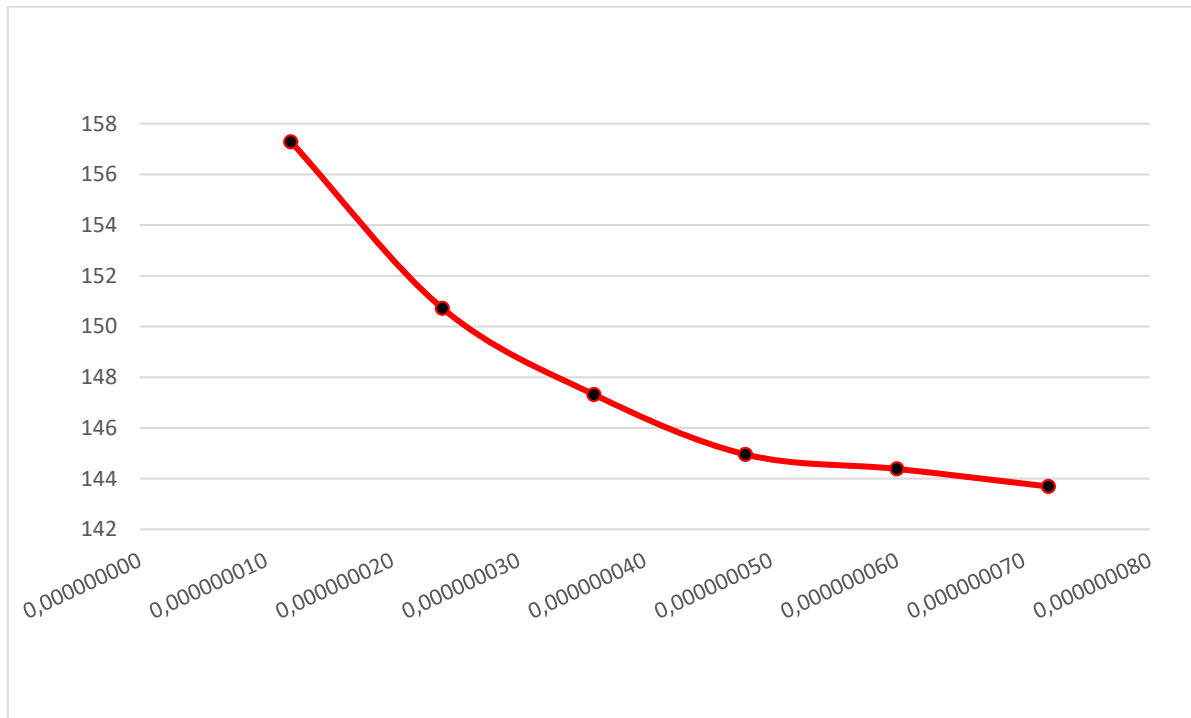


Рис. 5.4 Графік залежності P_i від C_2

На рисунку 5.5 зображений графік залежності втрат електроенергії у активному опорі фільтра R_f від C_2 .

На даному графіку (рис. 5.5) спостерігається падіння втрат електроенергії у активному опорі фільтра R_f зі збільшенням значення ємності конденсатора C_2 . Стрімке падіння втрат спостерігається на проміжку від $0,012\text{мкФ}$ до $0,036\text{мкФ}$. На проміжку від $0,036\text{мкФ}$ до $0,048\text{мкФ}$ падіння втрат зменшується. Від $0,048\text{мкФ}$ до $0,072\text{мкФ}$ падіння втрат майже не спостерігається.

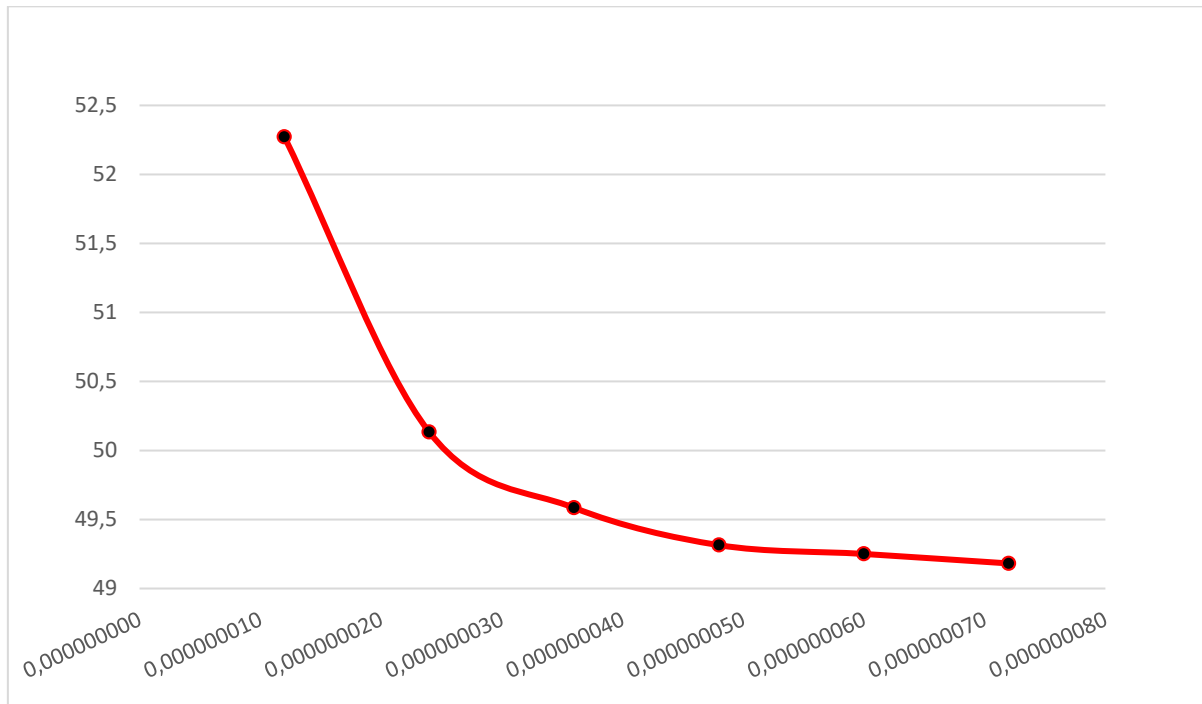


Рис. 5.5 Графік залежності R_f від C_2

На рисунку 5.6 зображений графік пульсацій для конденсатора C_2 ємністю $0,072\text{мкФ}$.

З графіку пульсації (рис. 5.6) для конденсатора ємністю $0,072\text{мкФ}$ можна побачити, що криві пульсації перетинаються в моменті часу $0,0038\text{с}$. Після того, як вони перетнулися, вони співпадають як по фазі, так і по амплітуді. За формулою 21 коефіцієнта пульсації амплітуди – розрахуємо даний параметр.

$$\Delta_p = \frac{\Delta_1 - \Delta_2}{2V_0} 100, \%$$

Виконавши підстановку значень у дану формулу, отримали значення $\Delta_p = 0,075\%$

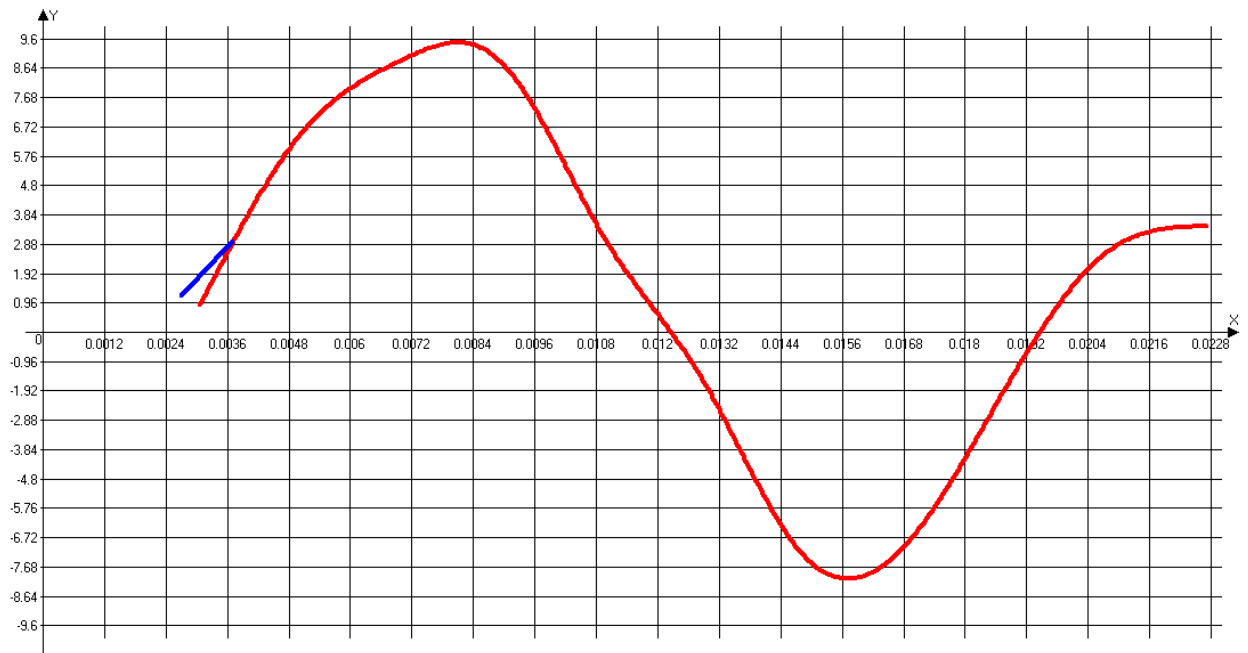


Рис. 5.6 Графік пульсації для схеми в якому $C_2 = 0,072 \text{ мкФ}$

На рисунку 5.7 зображений графік пульсацій для конденсатора C_2 ємністю $0,012 \text{ мкФ}$.

З графіку пульсації (рис. 5.7) для конденсатора ємністю $0,012 \text{ мкФ}$ можна побачити, що криві пульсації перетинаються в моменті часу $0,005 \text{ с}$. Після того, як вони перетнулися, вони співпадають як по фазі, так і по амплітуді. За формулою 21 коефіцієнта пульсації амплітуди – розрахуємо даний параметр.

$$\Delta_p = \frac{\Delta_1 - \Delta_2}{2V_0} 100, \%$$

Виконавши підстановку значень у дану формулу, отримали значення $\Delta_p = 0,42\%$

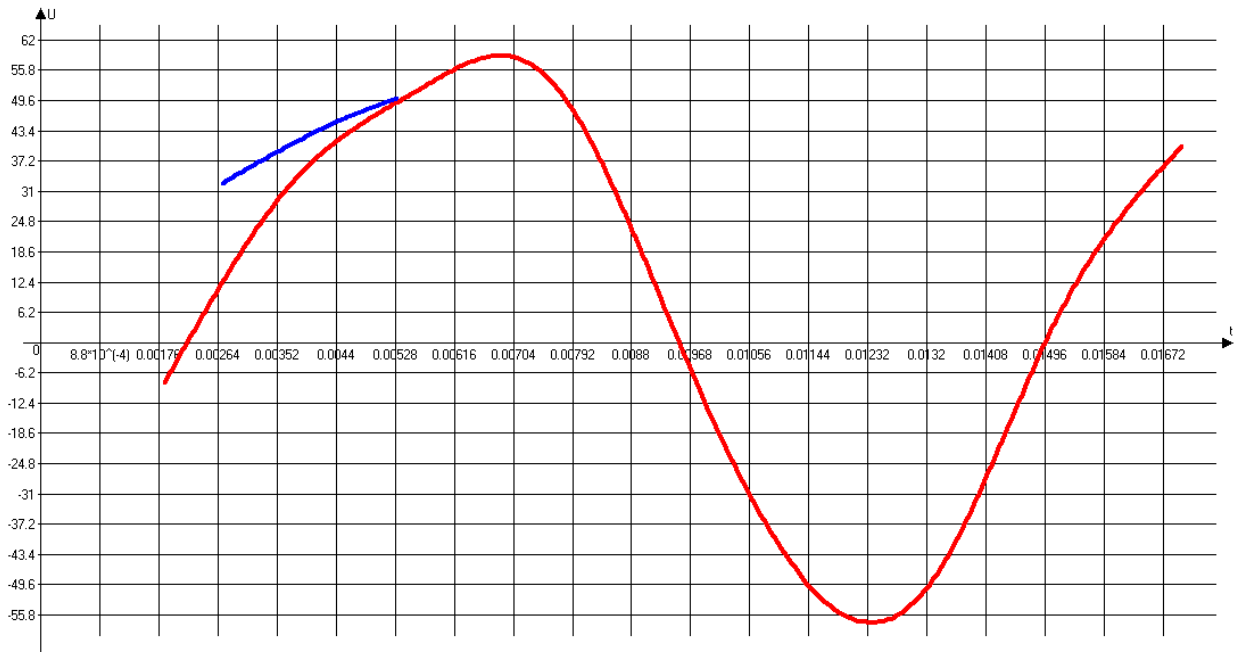


Рис. 5.7 Графік пульсації для схеми в якому $C_2 = 0,012 \text{ мкФ}$

За формулою 21 розраховуємо коефіцієнт пульсації амплітуди для інших конденсаторів ємністю $0,024 \text{ мкФ}$; $0,036 \text{ мкФ}$; $0,048 \text{ мкФ}$; $0,06 \text{ мкФ}$. Даний параметр наведений у таблиці 5.1.

Розрахувавши всі первинні та вторинні параметри, у даному та попередніх розділах, зведемо всі дані в кінцеву таблицю (табл. 5.1).

Як видно з графіків пульсації (рис. 5.6-5.7) коефіцієнт пульсації при зменшенні ємності – збільшується. Якщо розглянути початкове значення коефіцієнта пульсації для конденсатора ємністю $C_2 = 0,072 \text{ мкФ}$, ми отримаємо значення, яка рівне $\Delta_p = 0,075\%$. При ємності $C_2 = 0,012 \text{ мкФ}$ – $\Delta_p = 0,42\%$. Отже, коефіцієнт пульсації зменшився у 6 разів, в порівнянні з початковим.

Таблиця 5.1 – Отримані первинні та вторинні значення

$C_2, мкФ$	$\Delta t, с$	$U_m, кВ$	$P_{LV}, Вт$	$P_i, Вт$	$P_f, Вт$	$\Delta_p, \%$
0,012	0,0010548414	28,73	7,32	311,31	52,71	0,42
0,024	0,0006542956	25,79	7,37	204,71	50,05	0,34
0,036	0,0005117385	24,2	7,4	173,28	49,52	0,22
0,048	0,0004062524	23,11	7,41	157,67	49,28	0,19
0,06	0,0003944609	22,57	7,42	149,38	49,25	0,014
0,072	0,000353743	22,07	7,43	143,69	49,18	0,075

Висновки до розділу 5

В даному розділі були побудовані наступні графіки на основі отриманих первинних і вторинних даних:

- графік залежності Δt від C_2 ;
- графік залежності U_m від C_2 ;
- графік залежності P_{LV} від C_2 ;
- графік залежності P_i від C_2 ;
- графік залежності R_f від C_2 ;
- графік пульсації для схеми в якому $C_2 = 0,072 \text{ мкФ}$;
- графік пульсації для схеми в якому $C_2 = 0,012 \text{ мкФ}$.

Розраховано коефіцієнти пульсації для кожного конденсатора, що показало обернену залежність коефіцієнта від ємності конденсатора. Тобто зі збільшенням ємності конденсатора коефіцієнт пульсації зменшується. У даному випадку спостерігається різниця у 6 разів.

**Розділ 6. Стартап: комерціалізація теми магістерської дисертації
«Вплив фільтрової ємності на характеристики високовольтного
випрямляча з подвоєнням напруги». Маркетинговий аналіз.**

Стартап - це щойно створена компанія (можливо навіть не є юридичною особою), яка знаходиться на стадії розвитку і будує свій бізнес на основі нових інноваційних ідей, або на основі технологій, які нещодавно з'явилися. Це тимчасова структура, що існує для пошуку бізнес-моделі, яку можна відтворити і масштабувати [12].

Стартап-проект розробляється протягом чотирьох етапів. Етапи розроблення стартап-проекту наведено в таблиці 1 з методичних рекомендацій [12].

Опис ідеї проекту та визначення загального напрямку використання.

Ідея проекту полягає у створенні компанії, сфера діяльності якої полягає у наданні послуг з розрахунку та аналізу впливу фільтрової ємності для економії на виробництво та утримання випробувальних та вимірювальних установок високої напруги постійного струму, електрофільтрів, установок для електрофарбування, установки для нанесення порошкових покриттів, установок електрокопчення. Опис ідеї стартап-проекту наведено в таблиці 6.1.

Таблиця 6.1 - Опис ідеї стартап-проекту

Зміст ідеї	Напрямки застосування	Вигоди для користувача
Виконати розрахунок для фільтрової ємності; вибір кращого випрямляча з подвоєнням напруги; внесення змін у технічну конструкцію випрямлячів в індивідуальному порядку для покращення технічних характеристик.	Надання комерційних послуг розрахунку, проектування та розробки випрямлячів.	Швидкий і якісний розрахунок потреб користувача; можливість для конструювання установки випрямляча на місці використання установки.

Аналіз потенційних техніко-економічних переваг ідеї (чим відрізняється від існуючих аналогів та замінників) порівняно із пропозиціями конкурентів передбачає:

- визначення переліку техніко-економічних властивостей та характеристик ідей;

- визначення попереднього кола конкурентів (проектів-конкурентів) або товарів-замінників чи товарів-аналогів, що вже існують на ринку, та проводиться збір інформації щодо значень техніко-економічних показників для ідеї власного проекту та проектів-конкурентів відповідно до визначеного вище переліку;

- проводиться порівняльний аналіз показників: для власної ідеї визначаються показники, що мають а) гірші значення (W, слабкі); б) аналогічні (N, нейтральні) значення; в) кращі значення (S, сильні) (табл. 6.2). [13]

Таблиця 6.2 - Визначення сильних, слабких та нейтральних характеристик ідеї проекту

№ п/ п	Техніко-економічні характеристики ідеї	(потенційні) товари/концепції конкурентів			W (слабка сторона)	N (нейтральна сторона)	S (сильна сторона)
		Мій проект	Конкурент 1	Конкурент 2			
1	Розрахунок фільтрової ємності випрямляча з подвоєнням напруги	Точний та якісний розрахунок, досконаліша методика.	Застаріла методика, менш точний розрахунок	Застаріла методика	Потреба у максимальній кількості даних	Розрахунок даних для випрямляча	Точніший розрахунок
2	Внесення технічних змін у конструкцію	Зміни у конструкції через точніший розрахунок	Немає можливості змін у конструкції	Лише обмежені зміни у конструкції	Потребує налаштувань та тестів обладнання	Широкий вибір компонентів	Доступність потрібних елементів, що зменшує вартість

Визначення технологічної реалізації проекту наведено у таблиці 6.3.

Таблиця 6.3 - Технологічна реалізація проекту

Ідея проекту	Технології її реалізації	Наявність технологій	Доступність технологій
Оцінка та аналіз на можливість та ефективність проведення вдосконалення установки.	Виконання аналізу на окремій комп'ютерній програмі	Наявна технологія	Доступна технологія на ринку
Математичний розрахунок та проектування випрямляча для окремих (даних) умов.	Розрахунок за допомогою алгоритму, коду	Наявна технологія, яка потребує вдосконалення	Доступність програмних розрахунків
Модифікація елементів випрямляча.	Здійснення заходів з модифікації випрямлячів.	Наявна технологія	Доступність всіх компонентів.

Отже, технічна реалізація даного проекту можлива. Технології є наявними та доступними.

Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту

Аналіз попиту представлений в таблиці 6.4.

Таблиця 6.4 - Попередня характеристика потенційного ринку стартап-проекту

Показники стану ринку (найменування)	Характеристика
Кількість головних гравців, од	5
Загальний обсяг продаж, грн/ум.од	600000грн
Динаміка ринку (якісна оцінка)	Зростає
Наявність обмежень для входу	Необхідність додаткового захисту ідеї, агресивна поведінка конкурентів
Середня норма рентабельності в галузі, %	Приблизно 50 - 60%

Потенційні групи клієнтів наведені у таблиці 6.5.

Таблиця 6.5 - Характеристика потенційних клієнтів стартап-проекту

Потреба, що формує ринок	Масовий ринок	Специфіка поведінки потенційних клієнтів	Вимоги споживачів до товару
Вартість використання матеріалів, витрата електроенергії для електрофарбування та випробувальних установок.	Енергетика	Матеріальне складова проблеми	Висока ефективність, економічна складова.
	Промисловості, що пов'язані з електрофарбуванням.	Час вирішення проблеми	Швидкість виконання, надійність.

Аналіз ринкового середовища наведена в таблицях 6.6-6.8.

Таблиця 6.6 – Фактори загроз

Фактор	Зміст загрози	Можлива реакція компанії
Поява нових технологій на ринку	Ріст конкуренції	Покращення характеристик проекту, більший час виходу на ринок
Політична нестабільність та воєнні конфлікти	Способи перерозподілу ресурсів, провокації розв'язання воєнних конфліктів	Як варіант вихід на інший ринок для пошуку потенційного покупця

Таблиця 6.7 – Фактори можливостей

Фактор	Зміст можливості	Можлива реакція компанії
Ріст ринку	Збільшення попиту користувачів	Підвищення конкурентоспроможності
Оновлення програмного забезпечення	Збільшення наданих послуг користувачам	Підвищення капіталу проекту

Таблиця 6.8 - Ступеневий аналіз конкуренції на ринку

Особливості конкурентного середовища	В чому проявляється дана характеристика	Вплив на діяльність підприємства (можливі дії компанії, щоб бути конкурентоспроможною)
1. Тип конкуренції: олігополія	Існує 2 компанії на українському ринку, які є конструкторами та виробниками подібних установок (ПрАТ «ЗТР», ВАТ «ДЕЗ»)	Покращення надійності проекту. Акцент на оформленні аналізу, щоб підкреслити унікальність саме своєї продукції. Цінове політика збуту та доставки продукції.
2. За рівнем конкурентної - національний	Компанія може конкурувати і за межами країни	Вихід на ринок за межами України
3. За галузевою ознакою - внутрішньогалузева	Компанія надає послуги тільки для споживачів певної галузі	Підвищення якості товару
4. Конкуренція за видами товарів: - консультативна; - продуктова.	Надання консультацій для підприємств з питань випрямлячів з подвоєнням напруг.	Підвищення кваліфікації персоналу. Покращення і впровадження нового технічного забезпечення.
5. За характером нецінова	Послуга не має фіксованої ціни. Розрахунок залежить від типу потрібних робіт та складності виконання.	Вимагати від виробника найвищої якості.

Обґрунтування факторів конкурентоспроможності наведені в таблиці 6.9.

Таблиця 6.9 - Обґрунтування факторів конкурентоспроможності

Фактор конкурентоспроможності	Обґрунтування (наведення чинників, що роблять фактор для порівняння конкурентних проектів значущим)
Висока точність аналізу	Використання системи аналізу фільтрової ємності допоможе більш точно використовувати випрямлячі з подвоєнням напруги та дозволить більше економити на даних установках
Ефективна система збуту	Потреба даної системи в енергетиці, промисловості, яка пов'язана з електрофарбуванням, нанесення порошкових покриттів
Ексклюзивність товарів	Завдяки новішій та досконалішій системі аналізу дозволяє якісніше розраховувати та збирати випрямлячі та установки подібні випрямлячам

За визначеними факторами конкурентоспроможності (табл. 6.9) проведено аналіз сильних та слабких сторін стартап-проекту (табл. 6.10).

Таблиця 6.10 - Порівняльний аналіз сильних та слабких сторін прогнозного методу

Фактор конкурентоспроможності	Бали 1-20	Рейтинг товарів-конкурентів у порівнянні з нашим прогнозним методом (ПрАТ «ЗТР», ВАТ «ДЕЗ»)						
		-3	-2	-1	0	1	2	3
Висока точність аналізу	15		•	*				
Ефективна система збуту	10	*		•				
Ексклюзивність товарів	17					•		*

Кінцевим етапом ринкового аналізу можливостей впровадження проекту є створення SWOT-аналізу (матриці аналізу сильних (Strength) та слабких (Weak) сторін, загроз (Troubles) і можливостей (Opportunities) (табл.

6.11) в основі виділених ринкових загроз та можливостей, та сильних і слабких сторін (табл. 6.10).

Перелік ринкових загроз та ринкових можливостей створено на основі аналізу факторів загроз та факторів можливостей маркетингового середовища. Ринкові загрози та можливості є наслідком впливу факторів, та, на відміну від них, ще не є реалізованими на ринку та мають деяку ймовірність здійснення.

Таблиця 6.11 - SWOT - аналіз стартап-проекту

Сильні сторони	Слабкі сторони
Система аналізу фільтрової ємності дозволяє отримати високу точність аналізу та ексклюзивність товару	Обмежений ринок збуту
Можливості	Загрози
Ріст ринку, оновлення програмного забезпечення	Поява нових технологій на ринку, політична нестабільність та воєнні конфлікти

Розроблення ринкової стратегії проекту.

Розроблення ринкової стратегії першим кроком передбачає визначення стратегії охоплення ринку: опис цільових груп потенційних споживачів (див. табл. 6.12), відповідно до [13].

Таблиця 6.12 – Вибір цільових груп потенційних споживачів

№ п/п	Опис профілю цільової групи потенційних клієнтів	Готовність споживачів сприйняти продукт	Орієнтовний попит в межах цільової групи (сегменту)	Інтенсивність конкуренції в сегменті	Простота входу у сегмент
1	Енергетика	Швидка	Товар буде мати невеликий попит	Дві компанії(ПрАТ «ЗТР», ВАТ «ДЕЗ»)	Все залежить від попиту
2	Промисловості, що пов'язані з електрофарбуванням	Найшвидша	Товар буде мати великий попит	Дві компанії(ПрАТ «ЗТР», ВАТ «ДЕЗ»)	Все залежить від спеціалістів
Які цільові групи обрано: обидві					

Як можна бачити із таблиці 6.12 компанія є зосередженою на двох ключових сегментах ринку, тому використовуємо диференційована стратегія маркетингу, відповідно до рекомендацій наведених у [13].

Сформуємо базову стратегію розвитку для просування на даних ринках (табл. 6.13), відповідно до [13]

Таблиця 6.13 - Визначення базової стратегії розвитку

№ п/п	Обрана альтернатива розвитку проекту	Стратегія охоплення ринку	Ключові конкурентоспроможні позиції відповідно до обраної альтернативи	Базова стратегія розвитку
1	Незалежно виготовляти та аналізувати продукт із можливістю виконання системи відповідно до специфіки замовника	Затягування нових споживачів, через рекламу у відповідних галузях	Забезпечення економії та якості продукту	Лідерство з економії

Визначимо базові стратегії конкретної поведінки, відповідно до [13] та зазначимо в табл. 6.14.

Таблиця 6.14 – Визначення базової стратегії конкретної поведінки

№ п/п	Чи є проект «першопрохідцем» на ринку?	Чи буде компанія шукати нових споживачів, або забирати існуючих у конкурентів?	Чи буде компанія копіювати основні характеристики товару конкурента, і які?	Стратегія конкурентної поведінки
1	НІ	Шукати нових	НІ	Виклик лідеру

Зробимо стратегію позиціонування (табл. 6.14), що полягає у формуванні ринкової позиції, за якими споживачі мають інфікувати проект [13].

Таблиця 6.15 – Визначення стратегії позиціонування

№ п/п	Вимоги до товару цільової аудиторії	Базова стратегія розвитку	Ключові конкурентоспроможні позиції власного стартап-проекту	Вибір асоціацій, які мають сформувати комплексну позицію власного проекту (три ключових)
1	Уніфікованість конструкції методу, простота у користуванні	Диференціація	Досконаліший метод для ринку України та Європи; - точність; - ексклюзивність	Ексклюзивність

Напрямок розвитку продукту (система аналізу фільтрової ємності) є створення системи, яка буде відрізнятись від аналогів та забезпечувати високу точність розрахунку впливу фільтрової ємності у випрямлячі з подвоєнням напруги.

Розроблення маркетингової програми стартап-проекту.

Найпершим кроком є формування *маркетингової концепції товару*, що отримує споживач. Для цього у табл. 6.16 підсумовуємо результати попереднього аналізу конкурентоспроможності товару [13].

Таблиця 6.16 - Визначення ключових переваг концепції потенційного товару

№ п/п	Потреба	Вигода, яку пропонує товар	Ключові переваги перед конкурентами (існуючі або такі, що потрібно створити)
1	Зменшення вартості установки випрямляча напруги	Висока точність розрахунку фільтрової ємності	Більш точний та якісніший розрахунок впливу фільтрової ємності на характеристики випрямлячів з подвоєнням напруги, економічність часу та ресурсів (оскільки надаються послуги з конструювання та збірки установок) у порівнянні з конкурентами

Як можна бачити із табл. 6.17 ключова переваги системи аналізу впливу фільтрової ємності на випрямляч напруги є зменшення вартості установки випрямляча напруги, що дозволяє замовнику економити на даних установках.

Розробимо трирівневу маркетингову модель продукту.

Таблиця 6.17 - Опис трьох рівнів моделі товару

Рівні товару	Сутність та складові		
I. Товар за задумом	Система аналізу фільтрової ємності високовольтного випрямляча з подвоєнням напруги – система, що аналізує фільтрову ємність у тому чи іншому випрямлячі та надає оперативну інформацію про характер потреби зміни деяких елементів випрямлячів для економії їхнього випуску. Зменшення вартості установки випрямляча напруги.		
II. Товар у реальному виконанні	Властивості/характеристики	М/Нм	Вр/Тх /Тл/Е/Ор
	1. Функціональне призначення – відслідковує найбільш слабкий для економії елемент, та вказує на нього. 2. Надійність – дана система буде функціонувати лише за потреби та постійно оновлюється. 3. Надійність буде складати 100% знаходження потрібного для заміни елемента. 4. Технологічність - процес аналізу буде досить точним та технологічним за рахунок постійного оновлення елементів системи.	1 М	1. Пр, Тх ,Тл, О 2. Пр, Тх ,Тл, О 3. Пр, Тх ,Тл, О 4. Пр, Вр, Тх ,Тл, О
		2 М	
		3 М	
		4 М	
	Якість: якість наведеної системи підтверджено розрахунками у САПР результати якого наведено у даній магістерській дисертації.		
	Пакування: система зберігається на онлайн та портативних носіях.		
Марка: назва організації LMS&P (lightning monitoring Systems & Protection), система моніторингу блискавок & захисту			
III. Товар із підкріпленням	Система аналізу впливу фільтрової ємності на високовольтний випрямляч		
	Інструкція для користування даною системою.		
Товар буде захищено від копіювання за допомогою міжнародного патенту.			

Далі визначимо цінові межі, якими потрібно керуватись при встановленні ціни на систему аналізу фільтрової ємності на випрямляч, результати представлені в табл. 6.18.

Таблиця 6.18 – Визначення меж встановлення ціни

№ п/п	Рівень цін на товари-замінники	Рівень цін на товари-аналоги	Рівень доходів цільової групи споживачів	Верхня та нижня межі встановлення ціни на товар/послугу
1	11000-15000 грн (в залежності від дослідження)	10000-22000 грн	Доходи споживачів (на прикладі УКРЕНЕРГО за січень-березень 2018 до 1,2 млрд грн)	Від 9000 до 30000 грн в залежності від складності аналізу

Визначаємо оптимальну систему збуту (табл. 6.19).

Таблиця 6.19 - Формування системи збуту

№ п/п	Специфіка закупівельної поведінки цільових клієнтів	Функції збуту, які має виконувати постачальник товару	Глибина каналу збуту	Оптимальна система збуту
1	Промисловий ринок. Втрата навіть одного споживача буде відображатися на закупівлях та рекламі компанії	Встановлення контактів та надання консультацій щодо користування системою. Виконання логістичних функцій щодо. Маркетингові дослідження.	Канал збуту однорівневий	Традиційна система збуту

Остання складова маркетингової програми – розроблення концепції маркетингових комунікацій, яка спирається на попередньо обрану основу для позиціонування та визначену специфіку поведінки клієнтів (табл. 6.20).

Таблиця 6.20 - Концепція маркетингових комунікацій

№ п/п	Специфіка поведінки цільових клієнтів	Канали комунікацій, якими користуються цільові клієнти	Ключові позиції, обрані для позиціонування	Завдання рекламного повідомлення	Концепція рекламного звернення
1.	Поведінку клієнта в сфері енергетики формують засоби економії.	Формальні та неформальні канали комунікацій (Інтернет, технічні виставки, інтернет-магазини)	Точний та низький за ціною аналіз впливу фільтрової ємності на високовольтний випрямляч напруги, що дозволить зменшити вартість виробництва окремих випрямлячів.	Інформаційне: формування знань про виробника і можливості застосування системи.	Головною структурою рекламного звернення буде надання інформації про економічність, технологічність системи аналізу фільтрової ємності. Формою рекламного звернення буде презентація професійної майстерності. Стиль науково-професійний
2.	Поведінку клієнта в сфері виробницт, що пов'язані з елеутрофарбуванням формують засоби швидкості виконання та надійності.	Формальні та неформальні канали комунікацій (Інтернет, технічні виставки, інтернет-магазини)	Якісний, надійний та швидкий за ціною аналіз впливу фільтрової ємності на високовольтний випрямляч напруги, що дозволить зменшити вартість виробництва окремих випрямлячів.	Інформаційне: формування знань про виробника і можливості застосування системи.	Головною структурою рекламного звернення буде надання інформації про економічність, технологічність системи аналізу фільтрової ємності. Формою рекламного звернення буде презентація професійної майстерності. Стиль науково-професійний

Висновки до розділу 6.

В ході маркетингово аналізу системи аналізу фільтрової ємності високовольтного випрямляча з подвоєнням напругу було проведено та обґрунтовано:

- доцільність такої системи для об'єктів енергетики та промисловості, які займаються електрофарбуванням та нанесенням порошкових покриттів;
- виконано технологічний аудит стартап-проектку на базі якого було обґрунтовано технічне здійснення даного проекту (системи аналізу);
- визначено фактори загроз та можливостей;
- обрано ринкову диференційовану стратегію розвитку та виклик лідеру, як стратегію конкурентної поведінки;

З попиту ринку було встановлено, що наша система має прямі аналоги, через що успіх реалізації стартап-проекту у даній галузі може бути сповільнений. Також варто відзначити, що дана система допоможе збільшити засоби економії для споживачів.

Збільшення клієнтської бази (підприємств, де можливо реалізувати дану систему) є однією з основних задач розвитку комерціалізації проекту за відсутності перешкод встановлення товару на ринку.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

В магістерській дисертації досліджено вплив фільтрової ємності на характеристики спеціалізованого високовольтного випрямляча з подвоєнням напруги. На основі розробленої математичної моделі здійснено ряд розрахунків параметрів випрямляча високої напруги з лінійним та нелінійним навантаженням при використанні рішення системи рівнянь сьомого порядку. Одержані результати розрахунків дозволяють вперше точно визначити вплив фільтрової ємності на інтегральні параметри випрямляча.

При проведенні розрахунків за початкове значення фільтрової ємності приймалося $0,072\text{мкФ}$, наведене в літературі. Дослідження виконані при шестикратному зменшенні фільтрової ємності до $0,012\text{мкФ}$ та збереженні всіх інших параметрів елементів випрямляча.

Показано, що при відповідному зменшенні фільтрової ємності необхідне збільшення максимальної напруги джерела живлення випрямляча з $U_m = 22,07\text{кВ}$ до $U_m = 28,7\text{кВ}$, що є суттєвим.

Проте, оскільки вартість високовольтного конденсатора є, зазвичай, пропорційною його енергії $(\frac{CU^2}{2})$ вищенаведене зменшення ємності фільтрового конденсатора (в 6 разів) з урахуванням збільшення його напруги забезпечить зменшення його енергії у 3,5 рази.

При цьому розрахований коефіцієнт корисної дії випрямляча збільшується з 75% до 85% при збереженні допустимого рівня пульсації напруги в навантаженні, що регламентується ГОСТ 1516.2.

Відповідні розрахунки показують перспективність стартапу з модернізації високовольтного спеціалізованого випрямляча з подвоєнням напруги.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Техніка та електрофізика високих напруг: Навч. посібник / За ред. В.О.Бржезицького та В.М.Михайлова. – Харків: НТУ «ХПИ» - Торнадо, 2005. – 930 с.
2. Brzhezitsky, V. O., Vendychanskyi, R. V., Trotsenko, Y. O., Haran, Y. O., Desyatov, O. M., & Khominich, V. I. (2018). CHARACTERISTICS OF SPECIALIZED SINGLE-PHASE HIGH VOLTAGE DOUBLER RECTIFIER. Електротехніка і Електромеханіка, (5), 54-61.
3. Dwivedi C. K., Daigavane M. B. Multi-purpose low cost DC high voltage generator (60 kV output), using Cockcroft-Walton voltage multiplier circuit. International Journal of Science and Technology Education Research, 2011, Vol. 2(7), pp. 109-119.
4. Brzhezitsky V., Desiatov O., Maslychenko I., Anokhin Y. Analytical research mode the voltage of high-voltage cascade generator with nonlinear loads. Scientific Works of NUFT. 2015, Vol. 21, No. 3, pp. 183-191. (Ukr.).
5. Brzhezitsky V., Desyatov O., Garan J., Babicheva A. Analysis of the current ripple of cascade generator high DC voltage. Scientific Herald of NULES of Ukraine. Series: Technique and energy of APK, 2015, No. 209-2, pp. 30-38. (Ukr.).
6. Merev A., Hällström J.K. A Reference System for Measuring High-DC Voltage Based on Voltage References. IEEE Transactions On Instrumentation And Measurement, 2015, Vol. 64, No. 1, pp. 184-189. doi: 10.1109/TIM.2014.2338673.
7. Anokhin Y.L., Brzhezytskyi V.O., Haran Ya.O., Masliuchenko I.M., Protsenko O.P., Trotsenko Ye.O. Application Of High Voltage Dividers For Power Quality Indices Measurement. Electrical Engineering & Electromechanics, 2017. No. 6, pp. 53-59. doi: 10.20998/2074-272X.2017.6.08.

8. Kravchenko V.I., Petkov A.A. Parametric synthesis of a high-voltage pulse test device with a capacitive energy storage device. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2007. No. 6, pp. 70-75. (Rus).
9. Shcherba A.A., Suprunovska N.I., Ivashchenko D.S. Modeling of nonlinear resistance of electro-spark load for synthesis of discharge circuit of capacitor by time parameters. *Tekhnichna Elektrodynamika*, 2014, No. 3, pp. 12-18. (Rus).
10. Suprunovska N.I., Shcherba A.A. Processes of energy redistribution between parallel connected capacitors. *Tekhnichna Elektrodynamika*, 2015, No. 4, pp. 3-11. (Rus.).
11. DSTU 3863-99. Derzhavnyy standart Ukrayiny. Metrolohiya. Derzhavna povirochna skhema dlya zasobiv vymiryuvan' elektrychnoyi napruhy postiynoho strumu v diapazoni vid 1 do 800 kV [DSTU 3863-99. State standard of Ukraine. Metrology, state verification schedule for means of measuring the electric voltage of direct current and in the range from 1 to 800 kV], 1999, 10p. (Ukr.).
12. Пікуль В. С. ЩО ТАКЕ СТАРТАП [Електронний ресурс]. Режим доступу: https://3222.ua/article/scho_take_startap.htm Дата звернення: Листопад, 2018
13. РОЗРОБЛЕННЯ СТАРТАП-ПРОЕКТУ, Методичні рекомендації до виконання розділу магістерських дисертацій для студентів інженерних спеціальностей, Київ, НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського», 2016